

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Roman Maslák



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 NS-3

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Roman Maslák

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Pavel Mašek, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Roman Maslák

ID: 186136

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

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

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude studium nastupující bezdrátové komunikační technologie LTE Cat-M1. V teoretické části práce bude provedeno porovnání dostupných LPWA technologií, kdy bude důraz kladen zejména na detailní rozbor technologií LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT (NB1, NB2) a LTE Cat-M1. Následně bude provedena implementace komunikačních scénářů pro přenos dat v rámci inteligentních sítí tj., SmartGrids. Implementace bude provedena v síťovém simulačním nástroji Network Simulator 3 (NS-3). Praktická část se bude sestávat z vytvoření komunikačního scénáře s využitím modulu LENA / LENA 5G, kdy bude pozornost soustředěna na specifický komunikační scénář, ve kterém budou koncové zařízení připojeny pouze k jedné základnové stanici. Student navrhne a implementuje úpravy modulu LENA a to tak, aby upravený modul umožňoval komunikaci dle standardu 3GPP Rel. 13 pro technologii LTE Cat-M1.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Network Simulator 3: Documentation, A Discrete-Event Network Simulator [online], 2019. Dostupné z: <https://www.nsnam.org/doxygen/>

[2] LIBERG, Olof, Mařten 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.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

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

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

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 práca je zameraná na implementáciu LTE Cat-M technológie v simulačnom nástroji Network Simulator 3 (NS-3). Na začiatku práca pojednáva o LPWA technológiách a ich využití. Popísané sú hlavné časti Internetu vecí (IoT) a Machine-to-Machine (M2M) komunikácie. Bližšie sú potom definované a popísané najvyužívanejšie technológie v LPWA sieťach. Medzi tieto technológie patrí Sigfox, LoRaWAN, Narrowband IoT (NB-IoT) a Long Term Evolution for Machines (LTE Cat-M), kedy LTE Cat-M technológia je popísaná podrobnejšie. K realizácii simulácií je využitý simulačný program NS-3 s LENA modulom. Následne sú implementované simulačné scenáre k získaniu potrebných znalostí o zmene parametroch siete v závislosti od nastavenia siete. Potom sú v rámci NS-3 realizované zmeny na Radio Resource Control (RRC) stavoch, pomocou ktorých je možné docieľiť správne fungovanie siete aby boli splnené požiadavky pre implementáciu LTE Cat-M technológie.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Internet vecí, IoT, Low Power Wide Area, Sigfox, LoRa, LoRaWAN, Narrowband IoT, LTE, LTE Cat-M, LTE Cat-M1, Network Simulator 3, LENA, RRC

ABSTRACT

The Diploma work deals with the implementation of LTE Cat-M technology in the simulation tool Network Simulator 3 (NS-3). The work describe LPWA technologies and their use cases. In first are described the main parts of the Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) communication. Subsequently are described and defined the most used technologies in LPWA networks. Technologies which are used in the LPWA networks are Sigfox, LoRaWAN, Narrowband IoT (NB-IoT) and Long Term Evolution for Machines (LTE Cat-M), where LTE Cat-M technology is described in more details. Simulations are simulated in simulation tool NS-3 and use LENA module. In NS-3 tool are simulated Simulations, which give us informations of Network state according to different Network set up. At the end are done changes of Radio Resource Control (RRC) states in NS-3 tool. These changes are required for correct implementation LTE Cat-M technology in NS-3 tool. Then we are able to simulate simulations, which meet to definition of LTE Cat-M technology.

KEYWORDS

Internet vecí, IoT, Low Power Wide Area, Sigfox, LoRa, LoRaWAN, Narrowband IoT, LTE, LTE Cat-M, LTE Cat-M1, Network Simulator 3, LENA, RRC

MASLÁK, Roman. *IMPLEMENTACE A VYHODNOCENÍ KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE LTE CAT-M1 V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ NS-3*. Brno, 2020, 147 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Pavel Mašek, Ph.D.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „IMPLEMENTACE A VYHODNOCENÍ KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE LTE CAT-M1 V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ NS-3“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavel Mašek, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

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



Projekt je spolufinancován Evropskou unií.

Obsah

Úvod	16
1 Internet Vecí	18
1.1 Základná charakteristika IoT	18
1.2 M2M komunikácia	21
1.3 LPWA siete	24
1.3.1 Sigfox	26
1.3.2 LoRaWAN	28
1.3.3 NB-IoT	31
1.3.4 LTE Cat-M	33
1.3.5 Porovnanie v súčasnosti dostupných technológií.	35
2 LTE Cat-M	36
2.1 Popis LTE Cat-M technológie	36
2.2 Základná charakteristika LTE Cat-M1	37
2.3 Architektúra LTE Cat-M1 technológie	38
2.3.1 Mechanizmus pre rozšírenie pokrytia	40
2.3.2 Mechanizmus pre šetrenie energie zariadenia	43
2.4 Frekvenčné pásma pre LTE Cat-M	46
2.5 Fyzická vrstva	46
2.5.1 Štruktúra rámca	47
2.5.2 Zdrojová mriežka	48
2.6 Mechanizmy zaisťujúce prenos dát	49
2.6.1 Duplex mód	49
2.6.2 Prenos v úzko pásmovom spektre	51
2.7 Spôsob prenosu dát v Downlink-u	52
2.7.1 Downlink sub rámec	53
2.7.2 Typy synchronizačných signálov v DL	55
2.7.3 Referenčný signál v DL	56
2.7.4 MPDCCH kanál	57
2.7.5 PDSCH kanál	58
2.8 Spôsob prenosu dát v Uplink-u	59
2.8.1 Uplink sub rámec	60
2.8.2 PRACH	61
2.8.3 Uplink Referenčné signály	62
2.8.4 PUSCH	64
2.8.5 PUCCH	65

2.9	Operačné módy technológie	66
2.10	IDLE mód zariadenia	67
2.10.1	Random access	69
2.10.2	Access Control	69
2.11	Connected mód zariadenia	70
2.11.1	Plánovanie	70
2.11.2	Náhodný prístup v pripojenom stave	73
2.11.3	Správa napájania	74
2.11.4	Správa mobility	74
2.12	Charakteristika RRC v IDLE a Connected móde	75
3	Sieťový simulačný nástroj NS-3	76
3.1	NS-3	76
3.2	LENA modul	77
4	Simulačný scenár	79
4.1	Úvodný scenár	79
5	Meranie parametrov mMTC v NS-3	85
5.1	Závislosť počtu koncových zariadení na parametre simulovanej siete v NS-3	85
5.2	Meranie poklesu priepustnosti siete	88
5.2.1	Bulk aplikácia ako generátor dátového toku	88
5.2.2	On-Off aplikácia ako generátor dátového toku	90
5.2.3	On-Off aplikácia ako generátor dátového toku s rôznym časom vysielania	94
5.2.4	Porovnanie odlišnej konfigurácie On-Off aplikácie ako generátora dátového toku	98
5.3	Vplyv nastavenia siete na parametre siete	101
5.3.1	Overenie základného nastavenia simulovanej siete	101
5.3.2	Parametre siete pri nastavení simulovanej siete pre LTE Cat-M technológiu	102
5.3.3	Vplyv základných nastavení na parametre siete	104
6	RRC stavy v simulačnom programe NS-3	108
6.1	Popis RRC stavov v simulačnom programe NS-3	108
6.2	Modifikácia RRC stavov v simulačnom programe NS-3	111
6.2.1	Modifikácia RRC stavov UE zariadenia	111
6.2.2	Modifikácia RRC stavov základovej stanice	113
6.3	Implementácia odpojenia a znovu pripojenia UE zariadenia	115

6.3.1	Využitie odpojenia a znova pripojenia UE zariadenia	119
6.4	Simulačný scenár s reálnymi parametrami siete	121
6.4.1	Vyhodnotenie simulácie s reálnymi parametrami siete	126
Záver		129
Literatúra		131
Zoznam symbolov, veličín a skratiek		134
Zoznam príloh		137
A	Zobrazenie pokrytia technológiou Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT a LTE Cat-M na Slovensku	138
B	Získané dáta zo simulačného scenára s reálnymi parametrami siete	140
C	Obsah priloženého CD	142
D	Využitý software	145
D.1	VMware Workstation PRO	145
D.2	Eclipse	145
D.3	NetAnim	146

Zoznam obrázkov

1.1	Rozdelenie IoT vrstiev.	20
1.2	Rozdiel v M2M a IoT komunikačným modelom.	22
1.3	Porovnanie požiadaviek, ktoré sú kladené na mMTC, URLLC a Mobilné siete.	23
1.4	Zapojenie topológie typu hviezda v LPWA sieti s využitím LTE Cat-M.	25
1.5	Porovnanie súčasných bezdrôtových komunikačných technológií.	25
1.6	Základná architektúra Sigfox technológie.	27
1.7	Logo Sigfox Slovensko.	27
1.8	Základná architektúra LoRaWAN technológie.	29
1.9	Logo LoRaWAN technológie.	29
1.10	Základná architektúra NB-IoT technológie.	31
1.11	Módy NB-IoT technológie.	32
1.12	Logo NB-IoT technológie.	32
1.13	Základná architektúra LTE Cat-M technológie.	33
1.14	Logo LTE Cat-M technológie.	34
2.1	Vývoj LTE Cat-M technológie a jej štandardizovanie v 3GPP Release.	36
2.2	Mapa s vývojom LTE Cat-M1 a NB-IoT technológie vo svete.	38
2.3	Základná architektúra LTE technológie.	39
2.4	Príklad prenosu dát v LTE Cat-M s využitím TTI zväzkov a obnovy paketov HARQ. [1]	41
2.5	Maximum Coupling Loss diagram pre prenos dát medzi stanicou a zariadením cez prostredie. [2]	42
2.6	Základné fungovanie PSM mechanizmu pre šetrenie energie.	43
2.7	Základné fungovanie eDRX mechanizmu pre šetrenie energie.	45
2.8	LTE Cat-M a LTE štruktúra rámca.	48
2.9	Jeden pár Physical resource block v LTE a LTE-M technológií.	49
2.10	Využitie úzko-pásmového spektra v 15 MHz LTE systéme.	51
2.11	Downlink kanály a signály v LTE Cat-M.	53
2.12	LTE Cat-M sub rámec - bit-mapa.	54
2.13	Štruktúra DL sub rámca v LTE.	55
2.14	Synchronizačné signály v FDD.	56
2.15	Synchronizačné signály v TDD.	56
2.16	Cell-specific referenčný signál v LTE Cat-M.	57
2.17	Enhanced resource-element groups (EREGs) pre MPDCCH.	58
2.18	Uplink kanály v LTE Cat-M.	60
2.19	Štruktúra PRACH preamble v LTE Cat-M.	61
2.20	Príklad konfigurácie PRACH kanála v LTE Cat-M.	62

2.21	Uplink referenčné signály v LTE Cat-M.	63
2.22	Protokolový balík pre LTE Cat-M.	67
2.23	Downlink plánovanie pri prenose s využitím MPDCCH a PDSCH bez opakovania v LTE Cat-M.	71
2.24	Downlink plánovanie pri prenose s využitím MPDCCH a PDSCH s opakováním v LTE Cat-M.	72
2.25	Uplink plánovanie pri prenose s využitím MPDCCH a PDSCH s opakováním v LTE Cat-M.	73
2.26	RRC stavy v IDLE a Connected móde.	75
3.1	NS-3 model vrstiev.	77
3.2	Charakteristika LENA modulu.	78
4.1	Ukážka úvodného scenára.	79
4.2	Priemerná dátová rýchlosť pre úvodný scenár.	81
4.3	Ukážka rozšíreného scenára.	82
4.4	Priemerná dátová rýchlosť pre rozšírený scenár.	84
4.5	Oneskorenie v závislosti na množstve zariadení pre LTE.	84
5.1	Priemerná stratovosť scenára v závislosti od počtu pripojených UE zariadení.	87
5.2	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím BulkSendHelper.	90
5.3	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie.	93
5.4	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a rôznym časovým rámcom vysielania dát.	95
5.5	Graf popisujúci priepustnosť UE zariadenia v čase v závislosti na postupnom pripájaní UE zariadení.	97
5.6	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a vysielaniu dát v rovnakom a rôznom časovom rámci.	99
5.7	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a vysielaniu dát v rovnakom a rôznom časovom rámci pre rozsah UE od 10 do 250.	100
5.8	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a nastavení pre LTE Cat-M technológiu.	104
5.9	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od využitej šírky pásma.	106

5.10	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od využitej šírky pásma pre UE zariadenia od 10 do 250.	107
6.1	Definícia RRC stavov pre UE v simulačnom programe NS-3.	110
6.2	Popis RRC stavu pred a po volaní metódy na odpojenie (pripojenie) UE zariadenia.	115
6.3	Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od manažovanie UE zariadení.	120
6.4	Graf popisujúci dosiahnutú priepustnosť siete pre každé UE zariadenie s využitím prvej aplikácie.	126
6.5	Graf popisujúci dosiahnutú priepustnosť siete pre každé UE zariadenie s využitím druhej aplikácie.	127
A.1	Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie Sigfox technológiou od spoločnosti SimpleCell Networks Slovakia.	138
A.2	Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie LoRaWAN technológiou od spoločnosti Antik.	138
A.3	Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie NB-IoT technológiou od spoločnosti Telekom.	139
A.4	Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie LTE Cat-M technológiou od spoločnosti Orange.	139
D.1	Ukážka vývojového programu Eclipse.	146
D.2	Ukážka programu NetAnim.	147

Zoznam tabuliek

1.1	Celosvetový počet IoT zariadení využívaných v jednotlivých segmentoch (od 2018 do 2020).	19
1.2	Operátori prevádzkujúci technológiu LoRaWAN na Slovensku.	30
1.3	Operátori prevádzkujúci technológiu NB-IoT na Slovensku.	32
1.4	Porovnanie v súčasnosti dostupných technológií.	35
2.1	Porovnanie LTE Cat-M1 a LTE Cat-M2 technológie.	36
2.2	Tabuľka jednotlivých pásiem a ich frekvenčného rozsahu pre UL a DL.	46
2.3	UL-DL konfigurácia pre TDD mód v LTE a LTE Cat-M.	50
2.4	LTE Cat-M úzko-pásmové spektrá v jednotlivých šírkach pásiem.	52
2.5	PDSCH modulácia a kódovanie a TBS index v LTE Cat-M.	59
2.6	Formáty PRACH kanálu v LTE Cat-M.	61
2.7	Umiestnenie DMRS v LTE Cat-M.	64
2.8	PUSCH modulácia, kódovanie a TBS index v LTE Cat-M.	65
2.9	PUCCH formáty v LTE Cat-M.	66
2.10	SIB typy v LTE Cat-M.	68
4.1	Hlavné parametre úvodného scenára.	80
4.2	Hlavné parametre rozšíreného scenára.	83
5.1	Priemerná stratovosť siete v závislosti od počtu UE zariadení.	86
5.2	Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím BulkSendHelper.	89
5.3	Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off App.	92
5.4	Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off App s rôznym časovým rámcom vysielania dát.	94
5.5	Porovnanie On-Off Aplikácií s rovnakým a rôznym časom vysielania dát a následný vplyv na priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení.	98
5.6	Overenie základnej (default) šírky pásma využívanej v simulovanom scenári.	101
5.7	Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off App nastaveniami pre LTE Cat-M technológiu.	103
5.8	Porovnanie priemernej priepustnosti pre šírku pásma 5 a 1,4 MHz.	105
6.1	Dosiahnutá priemerná priepustnosť v závislosti od manažovania pripojených UE zariadení.	119
B.1	Získané parametre z vysielania dát pri využití prvej aplikácie ako zdroja pre vysielanie dát.	140

B.2	Získané parametre z vysielania dát pri využití druhej aplikácie ako zdroja pre vysielanie dát.	141
-----	--	-----

Zoznam výpisov

5.1	Základné nastavenia pre simulačný scenár.	85
5.2	Základné nastavenia BulkSendHelper pre generovanie dát.	86
5.3	Základné nastavenia BulkSendHelper pre generovanie dát pre meranie priepustnosti.	88
5.4	Základné nastavenia On-Off Aplikácie pre generovanie dát pre meranie priepustnosti.	91
5.5	Základné nastavenia On-Off Aplikácie pre generovanie dát s definovaným časovým rámcom vysielania dát.	96
5.6	Nastavenie šírky pásma na hodnotu 5 MHz.	101
5.7	Nastavenie šírky pásma a ďalších hodnôt, ktoré definujú LTE CAT-M technológiu.	102
6.1	Získanie aktuálneho RRC stavu a následný výpis pre UE zariadenie.	108
6.2	Pridanie metód do knižnice RRC stavov pre UE zariadenia v simulačnom programe NS-3.	111
6.3	Modifikovanie metód pre RRC stavy pre UE zariadenia v simulačnom programe NS-3.	112
6.4	Pridanie metódy do knižnice RRC stavov pre základovú stanicu v simulačnom programe NS-3.	114
6.5	Definícia metódy pre odpojenie UE zariadenia.	116
6.6	Definícia metódy pre znovu pripojenie UE zariadenia.	117
6.7	Príklad volania metód pre odpojenie a pripojenie UE zariadenia	118
6.8	Prvotné pripojenie a následne odpojenie UE zariadenia.	121
6.9	Nastavenie prvej aplikácie a následná inštalácia na UE zariadenia.	122
6.10	Nastavenie vysielania dát pre prvé kolo.	123
6.11	Nastavenie druhej aplikácie a následná inštalácia na UE zariadenia.	124
6.12	Nastavenie vysielania dát pre druhé kolo.	125

Úvod

Diplomová práca sa zaoberá Low-Power Wide-Area (LPWA) technológiami, ktoré v posledných rokoch začínajú naberať na dôležitosť. Využitie technológií reflektuje vo vytváranie nových komunikačných LPWA sietí, ktoré sa spájajú s využívaním senzorických zariadení spolu s využitím Machine-to-Machine (M2M) komunikácie. LPWA technológie sú základom pre koncept Internet of Things (IoT) s využitím veľkého množstva koncových zariadení. IoT nachádza využitie v budovaní takzvaných inteligentných miest (SmartCities), ďalej v oblasti zabezpečenia alebo v Priemysle 4.0.

V prvej časti práce sú popísané a porovnané najrozšírenejšie LPWA technológie prevádzkované v licenčnom aj bez licenčnom frekvenčnom pásme. Medzi technológie pracujúce v licenčnom pásme je možné zaradiť Long Term Evolution for Machines (LTE Cat-M) a Narrowband IoT (NB-IoT). Technológie využívajúce licenčné pásmo sú zastrešené pod Third Generation Partnership Project (3GPP) organizáciou. Ďalej sú popísané technológie, ktoré sú prevádzkované v bez licenčnom pásme: tzv. Sigfox a Long Range Wide Area Network (LoRaWAN).

Následne je pre potreby diplomovej práce bližšie popísaná a definovaná LTE Cat-M technológia špecificky potom LTE Cat-M1 definovaná v 3GPP Release 13. Z LTE Cat-M technológie je detailnejšie charakterizovaná a popísaná fyzická vrstva, u ktorej sú popísané komunikačné kanály a signály pre oba smery komunikácie, teda pre Uplink aj pre Downlink. Pre potreby následnej implementácie LTE Cat-M technológie sú popísané Radio Resource Control (RRC) stavy a ich správne fungovanie.

Pre implementáciu LTE Cat-M technológie je využitý simulačný nástroj Network Simulator 3 (NS-3) s využitím LTE/EPC Network Simulator (LENA) modulu. LENA modul sa využíva pre implementovanie scenárov založených na komunikačnej technológii LTE. V prvej časti je realizované overenie základnej a správnej funkčnosti kľúčových scenárov pri využití LENA modulu a veľkého množstva pripojených koncových zariadení (až 500 koncových zariadení) k jednej základovej stanici, to znamená realizáciu scenárov mMTC (massive Machine-Type Communication).

Následne sú realizované simulácie pre získanie informácií o správaní sa siete a zmenách parametrov siete v prípade modifikácií nastavení simulovanej siete orientovanou pre mMTC a riadenie pridelovania sieťových kapacít pre koncové zariadenia. V rámci simulácií sú tak využité rôzne typy aplikácií pre generovanie dátového toku, je aplikovaná zmenená šírka pásma a je využitý rôznych počet koncových zariadení pripojených k jednej základovej stanici.

Po získaní potrebných znalostí o správaní sa siete pri zmenách vykonaných na nastaveniach simulovanej siete je prístupné k zisťovaniu RRC stavov v LENA module počas simulácie scenára. Následne sú realizované nevyhnutné zmeny pre správne

fungovanie RRC stavov k dosiahnutiu požadovanej implementácie LTE Cat-M technológie. Po implementácii sú realizované simulácie pre overenie správnej funkčnosti vykonaných zmien na RRC stavoch a nakoniec je realizovaný scenár pre simuláciu, čo najreálnejšieho nasadenia LTE Cat-M technológie podľa reálnych predpokladov využívania LTE Cat-M technológie. Jedná sa napríklad o scenáre s využitím veľkého počtu koncových zariadení, ktoré majú za úlohu napr.: zber fyzických dát zo svojho okolia, komunikovať medzi sebou (využívanie v doprave) a iné.

1 Internet Vecí

V nasledujúcej sekcii 1.1 bude definovaný a charakterizovaný Internet vecí - Internet of Things (IoT), jeho súčasný stav a využiteľnosť.

IoT technológia je smer, ktorým v súčasnosti smeruje mnoho odvetví. Jeho základ však vychádza ešte zo 70. rokov 20. storočia zo Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA). Jednalo sa o potrebu monitorovania a kontrolovania systémov na určitú vzdialenosť. SCADA využíval pre prenos napríklad tienenú dvoj-linku. SCADA technológiu je tak možno považovať za akýsi základ, predchodcu pre súčasnú LPWA technológiu. V súčasných IoT scenároch je stále priestor pre drátový prenos dát ale uplatnenie nachádza skôr bezdrôtový prenos dát.

V nasledujúcej sekcii budú definované technológie, ktoré nachádzajú v súčasnej technológii IoT uplatnenie. A to najmä technológie typu:

- Long Range Wide Area Network (LoRaWAN),
- Sigfox,
- Narrowband Internet of Things (NB-IoT),
- Long Term Evolution for Machines (LTE-M).

1.1 Základná charakteristika IoT

Internet vecí, poprípade IoT sa za posledné roky dostáva čím ďalej tým viac do pozornosti, najmä v oblasti informačných technológií, bližšie potom v oblasti komunikačných technológií.

Fyzické zariadenie môžeme v kontexte Internetu vecí charakterizovať ako zariadenia, ktoré môžu byť rádovo o veľkosti niekoľko desiatok milimetrov (zariadenie pre meranie teploty), avšak aj podstatne väčšie ako napr. inteligentné vozidlo.

Medzi najdôležitejšie vlastnosti týchto zariadení môžeme zaradiť: [1]

- zariadenie disponuje možnosťou pripojenia do siete a následnej komunikácie, prenosu získaných dát ďalej na server (cloud),
- zariadenie je schopné merať fyzikálne veličiny a získané dáta následne lokálne ukladať, poprípade zasielať k analýze,
- Nízko-energetické prevádzkovanie zariadenia (zariadenie je možné napájať zo zdroja, ktorým môže byť napr. batéria alebo akumulátor),
- využívanie Low-Power Wide-Area (LPWA) technológií v súčasnom IoT.

Bližšie využitie IoT nachádza napríklad v priemysle, kedy pri využití IoT v priemysle sa môžeme stretnúť s pojmom Priemysel 4.0. Jedná sa o využívanie chyt-

rých zariadení v priemyselnom sektore. Súčasný trend je tak digitalizácia a automatizácia pracovných procesov, čo má za následok efektívnejšie výrobné postupy.

V Priemysle 4.0 nachádzajú uplatnenie rôzne druhy senzorov ako sú napríklad:

- senzory na meranie fyzikálnych veličín: meranie teploty, vlhkosti, plynomer, elektromer a iné,
- senzory na zabezpečenie okolia: pohybové senzory, senzor otvorenia dverí a iné,
- ďalšie typy senzorov: napríklad snímač výšky hladiny.

Využitie týchto zariadení (senzorov) poskytuje možnosť vzdialenej kontroly a snímania požadovaných údajov, fyzikálnych veličín. Ďalšie výhody Priemyslu 4.0 sú efektívnejšie pracovné procesy, zníženie nákladov na výrobu, kvalitnejšie výstupné produkty. Nevýhodou môžu byť prvotné zvýšené náklady na zriadenie monitorovania technologických procesov a taktiež následné udržiavanie komunikačnej infraštruktúry. [3]

Následné uplatnenie inteligentných zariadení pripojených do siete je možné rozdeliť do niekoľkých hlavných odvetví. Prehľad jednotlivých odvetví a počtu zariadení v týchto odvetviach je zobrazený v Tab. 1.1.

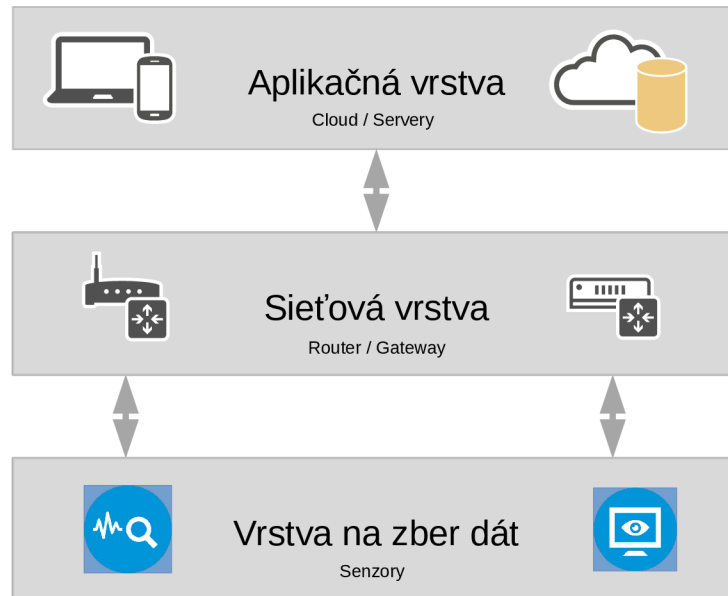
Segment	Rok 2018	Rok 2019	Rok 2020
Vládny segment	400	530	700
Automatizované budovy	230	310	440
Fyzické zabezpečenie	830	950	1 090
Automobilový segment	270	360	470
Zdravotnícky segment	210	280	360
Ostatné	2 020	2 380	2 750
Celkovo [miliónov]	3 960	4 810	5 810

Tab. 1.1: Celosvetový počet IoT zariadení využívaných v jednotlivých segmentov (od 2018 do 2020). [4]

Medzi vrstvy definujúce proces fungovania fyzického zariadenia v IoT je možné definovať hlavné tri časti, ktoré sú zobrazené na Obr. 1.1. Zoznam jednotlivých vrstiev:

1. Prvou vrstvou je Perception Layer. Táto vrstva zahŕňa všetky fyzické senzory, ktoré slúžia na získavanie dát. Zber dát zo svojho okolia ako je snímání teploty, výška hladiny vody v nádrži a iné.
2. Druhou vrstvou je Network Layer, ktorá má za úlohu prenos dát po sieti. Fyzické zariadenie tak získané dáta zo senzorov spracuje a odošle na uloženie.

3. Tretou vrstvou je Application Layer, kde sa získané dáta zo senzorov ukladajú pre následné spracovanie a vyhodnotenie. K ukladaniu dát sa v poslednej dobe čoraz viac využíva Cloud, ktorý má mnoho výhod, ako je prístupnosť k dátam odkiaľkoľvek z verejnej siete [5].



Obr. 1.1: Rozdelenie IoT vrstiev. [6]

Perception Layer je vrstvou, ktorá zabezpečuje zber dát pomocou senzorov dostupných na fyzickom zariadení. Ako príklad zariadenia môže byť napríklad:

- chytrý mobil, ktorý disponuje mnohými senzormi: GPS, gyroskop, svetelný senzor,
- úzko profilové senzory ako je napríklad senzor na meranie teploty.

Zariadenia pracujúce v tejto vrstve často disponujú minimálne určitou (aj malou) kapacitou úložiska a určitou výpočtovou kapacitou. [5]

Network Layer má za úlohu prenos dát získaných z fyzických zariadení ďalej až k serveru. Využíva Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL) protokol, ktorý primárne určený pre LPWA siete.

RPL protokol k svojej činnosti využíva vektor vzdialenosti, pomocou ktorého sa vytvára Destination Oriented Directed Acyclic Graph (DODAG). DODAG slúži na zistenie najlepšej trasy pre prenos dát. [5]

Application Layer je vrstvou, ktorá zabezpečuje formátovanie a prezentovanie získaných dát z fyzických zariadení. Vrstva je typicky založená na Hypertext Transfer Protocol (HTTP). Pri využití IoT nachádzajú uplatnenie aj ďalšie protokoly ako

napríklad Constrained Application Protocol (CoAP) a Message Queue Telemetry Transport (MQTT). Pre senzorové siete potom ešte konkrétne Message Queue Telemetry Transport for Sensor Networks (MQTT-SN).

CoAP protokol je určitou náhradou za HTTP protokol, ktorý sa využíva vo väčšine IoT aplikácií. CoAP protokol využíva dátový formát typu Efficient XML Interchanges (EXI), ktorý je oveľa účinnejší pri úspore miesta ako tomu je pri HTML/XML. Pre prenos využíva UDP v spojení s potvrdzovacími správami.

MQTT protokol je protokol využívajúci TCP protokol. Bol vyvinutý firmou IBM primárne ako klient/server protokol. MQTT je lightweight protokol, vďaka čomu nachádza uplatnenie v mnohých IoT aplikáciach, ktorým neprekáža využitie TCP protokolu. [5]

1.2 M2M komunikácia

Pod pojmom Machine-to-Machine (M2M) komunikáciou si je možné predstaviť komunikáciu, kedy komunikácia prebieha priamo medzi dvomi a viac zariadeniami, bez nutnosti ľudskej interakcie, jedná sa o zariadenia s malým zdrojom energie a nízkou výpočtovou silou v prípade, kedy ide o zariadenia napríklad pre meranie fyzikálnych veličín (meranie teploty, výšky hladiny vody, atď). Dôležitosť M2M komunikácie je možné spájať s rastúcim trendom okolo IoT, kedy sa okrem označenia komunikácie M2M je možné stretnúť taktiež s označením Machine Type Communication (MTC). Následne je možné sa stretnúť ešte s pojmom Massive Machine Type Communications (mMTC), ktorý je definovaný veľkým množstvom pripojených koncových zariadení pričom tieto zariadenia po sieti prerušovane vysielajú malý objem dát.

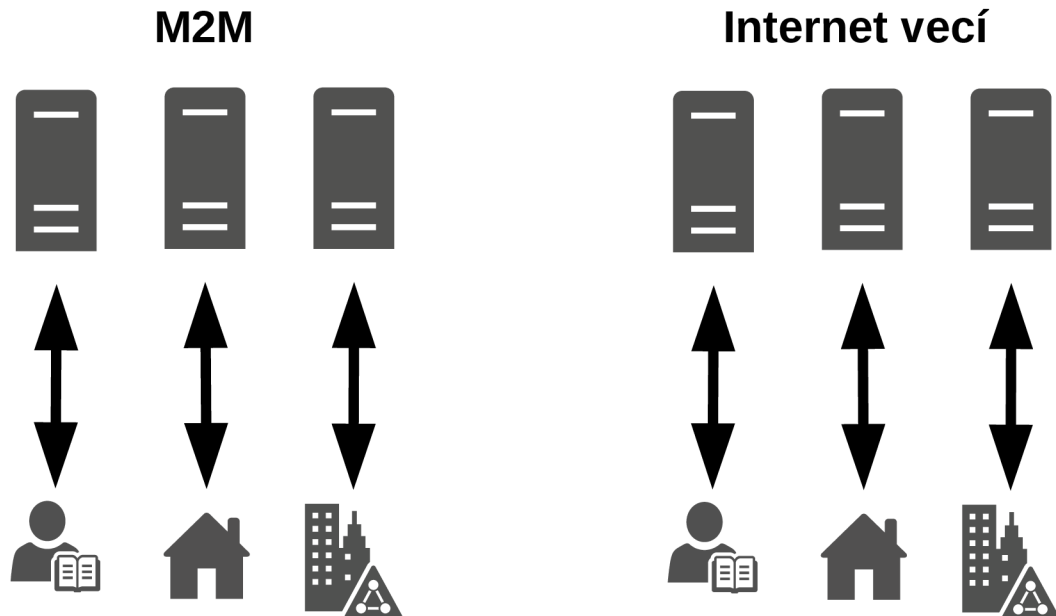
Tak M2M komunikácia nachádza uplatnenie napríklad aj v privátnych sieťach. Kedy môže nastať situácia, že prenos nie je vôbec potrebné zabezpečiť (šifrovať).

Pri pojme End-To-End (E2E) komunikácií sa uvažuje o komunikácií aj v rámci verejnej siete. Príklad takejto komunikácie môže byť napríklad verejná IP kamera (s obmedzeným prístupom / bez obmedzeného prístupu) poprípade diaľkové odčítanie spotreby energie pomocou elektromeru. Prenášané dáta sú cez verejnú sieť a tak sa v takomto prípade často využíva k zabezpečeniu dát šifrovanie (Rivest–Shamir–Adleman (RSA) s využitím verejného (public key) a súkromného (private key) kľúča).

Typ E2E komunikácie sa využíva napríklad aj pri LTE Cat-M alebo NB-IoT technológiách.

Medzi požiadavky kladené pre E2E komunikáciu v rámci priemyselných sietí patrí:

- nízka energetická náročnosť (jednotky, desiatky mW),
- veľký komunikačný dosah (jednotky, desiatky km),
- prijateľnosť väčšej latencie (jednotky, desiatky sekúnd),
- obmedzená prenosová rýchlosť (rádovo desiatky, stovky kb/s) a ďalšie.



Obr. 1.2: Rozdiel v M2M a IoT komunikačným modelom.

V popise nastupujúcej technológií 5G sa z hľadiska využitia a ďalších požiadaviek sa IoT delí pri najmenšom do dvoch kategórií:

1. Massive Machine-Type Communications,
2. Ultra Reliable and low latency communications (URLLC).

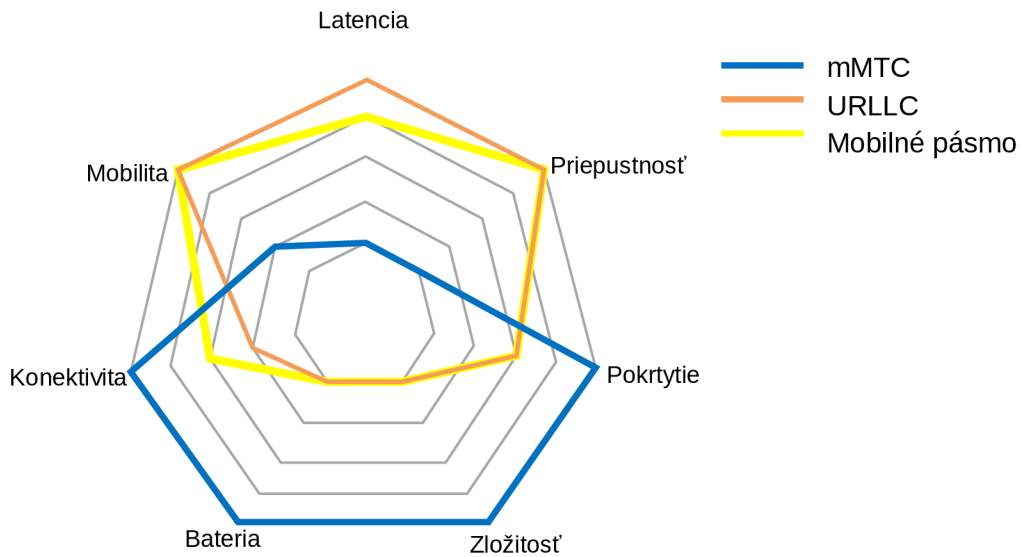
Vývoj 5G technológie a jej následné nasadenie zohráva veľkú rolu pri zlepšení a zrýchlení prenášaných užívateľských dát. Mimo to však prináša vylepšenia a výhody voči súčasnej architektúre, službách a využiteľnosti.

Jej vývoj a nasadenie má taktiež veľký význam pri rozširovaní IoT technológií. Pri rozširovaní IoT technológie a nasadzovaní čím ďalej tým väčšieho množstva zariadení stúpajú požiadavky na celú sieť a potrebu prenosu zvyšujúceho sa množstva prenášaných dát.

Túto potrebu má 5G technológia uspokojiť. Pri určitých IoT aplikáciách poskytuje voči 4G: podporu väčšieho množstva pripojených zariadení, poskytne podporu

rôznorodých prenosových rýchlosti, širok pásiem, a požiadaviek na kvalitu podľa jednotlivých IoT aplikácií. [7]

Pre mMTC kategóriu sa uvažuje o využívaní zariadení ako sú Smart Wearables zariadenia pre monitorovanie biologických stavov človeka (napr.: Smart hodinky, snímač tepu) a Sensor Network s využitím meracích zariadení fyzikálnych vlastnosti okolia zariadenia (napr.: snímač úniku plynu) a iné. Pre URLLC kategóriu sa uvažuje o vysoko náročných zariadeniach ako sú autonómne riadené autá, autonómne továrne a ďalšie. [2]



Obr. 1.3: Porovnanie požiadaviek, ktoré sú kladené na mMTC, URLLC a Mobilné siete. [2]

Pre využívanie mMTC komunikácie sa najčastejšie uvažuje v sieťach LPWA, kedy sú splnené požiadavky pre nízku spotrebu (zariadenie je napájané napr. z batérie) a veľkú komunikačnú vzdialenosť (jednotky, desiatky kilometrov). V súčasnosti sa môžeme stretnúť s nosnou sieťou pre mMTC komunikáciu so sieťou patriacej do 2G sietí Global System for Mobile/Enhanced Data GSM Evolution (GSM/EDGE), ktorá má niekoľko výhod pre využitie, ako napr. v súčasnosti nízka cena komunikačného modulu (rádovo jednotky dolárov). [2]

1.3 LPWA siete

Low-Power Wide-Area (LPWA) jedná sa o typ siete, ktoré nachádzajú uplatnenie v Internetu vecí. LPWA technológie poskytujú možnosť pripojenia fyzických zariadení, ktorými môžu byť napríklad rôzne senzory a následne umožňuje týmto zariadeniam komunikáciu (dátové prenosy) na veľkú vzdialenosť s obmedzenou prenosovou rýchlosťou.

LPWA sieť je možné charakterizovať nasledujúcimi atribútmi: [1]

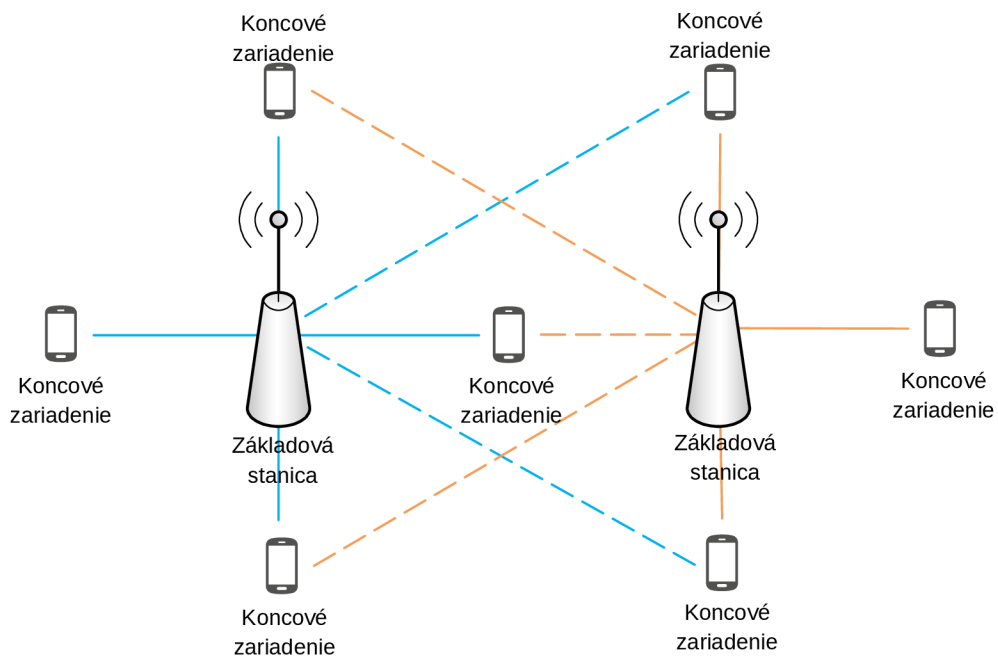
- "Long range" – prenos malého množstva dát na veľké vzdialenosti (rádovo jednotky, desiatky bajtov),
- "Low power" – zariadenie je napájané z obmedzeného zdroja energie (napríklad z batérie),
- "Low cost" – využitie cenovo dostupných modulov, možnosť využitia bez licenčného pásma.

LPWA siete podobne ako iné môžu operovať v niekoľkých možných zapojeniach – topológiach. V spojení s LPWA sa však najčastejšie uplatňuje zapojenie do topológie typu hviezdy.

Pri topológii typu hviezda sa využíva typ zapojenia, kedy je koncové zariadenie pripojené ku cloud-u pomocou jednej základovej stanici. Základová stanica môže byť rôzneho typu, napríklad typu: base transceiver station (BTS), NodeB, E-UTRAN Node B (eNodeB), poprípade 5G Base Station (gNodeB).

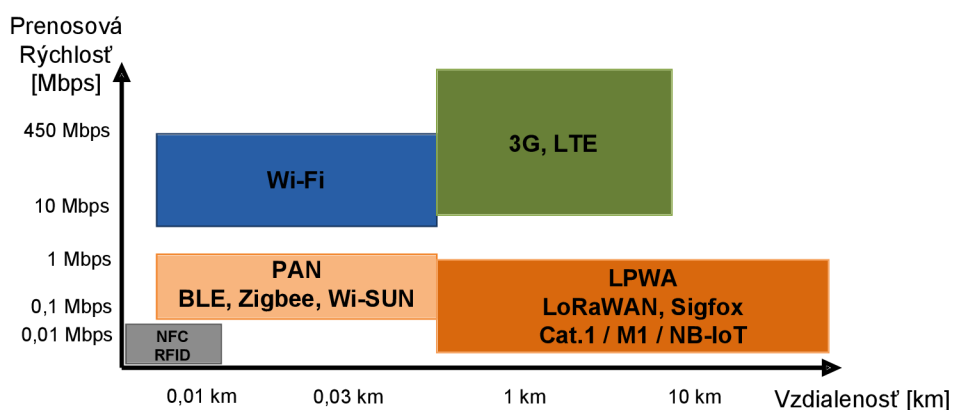
Následne pri využití bunkovej topológie pri LPWA sietí a napríklad Sigfox, poprípade LoRaWAN technológie je možnosť využitia prenášania dát cez viacej základových staníc, kedy je zabezpečené stále pripojenie a prenos dát aj v prípade výpadku jednej zo základových staníc.

Podmienkou je aby bolo koncové zariadenie v dosahu aspoň dvoch základových staníc ako je zobrazené na Obr. 1.4. Tým sa môže zabezpečiť vysielanie dát z koncového zariadenia s využitím viacerých základových staníc avšak v určitý čas prebieha prenos dát výhradne len cez jednu základovú stanicu.



Obr. 1.4: Zapojenie topológie typu hviezda v LPWA sietí s využitím LTE Cat-M. [2]

S rastúcim vývojom a zvyšujúcou dôležitosťou IoT tak LPWA siete zaujímajú vyššiu dôležitosť ako iné siete napríklad siete s obmedzeným dosahom – Bluetooth, Near Field Communication (NFC), štandardné bezdrôtové siete – wireless fidelity (Wi-Fi) a taktiež celulárnymi sieťami ako môže byť napríklad Global System for Mobile Communications, Long Term Evolution (LTE) a ďalšími sieťami. Porovnanie LPWA technológií s niekoľkými najrozšírenejšími typmi technológií je zobrazené na nasledujúcom obrázku Obr. 1.5.



Obr. 1.5: Porovnanie súčasných bezdrôtových komunikačných technológií. [8]

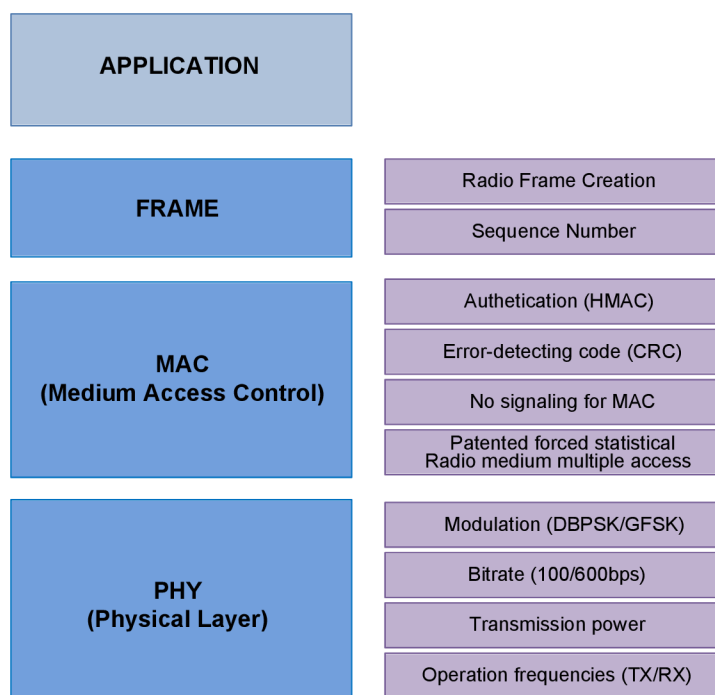
1.3.1 Sigfox

Jedná sa o jednu z prvých LPWA technológií, ktorá je pod záštitou Sigfox S.A. Technológia Sigfox je prevádzkovaná v bez licenčnom pásme industrial, scientific and medical (ISM). Jedná sa o bez licenčné frekvenčné pásmo využívajúce vyčlenenú šírku pásma: 868 MHz pre Európu, 915 MHz pre Severnú Ameriku a 433 MHz pre Áziu. Na Slovensku sa tak využíva pre prenos 868 MHz pásmo (863 - 870 MHz).[9]

Technológia Sigfox využíva pri prenose správ Ultra-Narrow Band (UNB) techniky. Pri prenose v Uplinku využíva Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) moduláciu a pri Downlinku využíva Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) moduláciu. Sigfox využíva 100 Hz šírku pásma. Maximálne prenosové rýchlosti, ktorých je pri technológii Sigfox možné dosiahnuť je 600 bps v Uplinku a 100 bps v Downlinku pre 868 MHz pásmo. Utlm vyjadrený ako MCL má pri Sigfox hodnotu 153 dB. [10]

Technológia poskytuje možnosť využitia Half Duplex módu. Latencia nadobúda hodnoty v rozsahu od 1 do 30 s. Teoretická životnosť zdroja energie pri zariadeniach pracujúcich v Sigfox technológii dosahuje maximálne necelých 10 rokov. Maximálny povolený výkon je určený na hodnotu 14 dBm. [10] Veľkosť správy je pre Sigfox technológiu je odlišná v závislosti od smeru komunikácie. Pre Uplink je veľkosť správy určená hodnotou 12 bytov. Pre Downlink je veľkosť správy maximálne 8 bytov. [9] Počet správ, ktoré je možné za deň preniesť je obmedzený na hodnotu 140 správ za deň. Hodnota obmedzenia je definovaná obmedzením duty-cycle (striedou), ktorá má hodnotu 1% času pre Uplink pre Downlink následne 10%. [9] Vzdialenosť na ktorú je možné zariadenie prevádzkovať sú rôzne, všeobecne však platí, že vo voľnej krajine je dosah približne na 50 km a v hustej mestskej zástavbe klesá na dosah približne na 3 až 5 km. [9]

Pre fungovanie zariadenia typu Sigfox nie je potrebná SIM karta a nemá ani pridelenú IP adresu v sieti. Zariadenie je priradené vlastníčkovi pomocou Device ID (ID) a Porting Authorization Code (PAC) kódu zariadenia, ktoré je možné meniť online.[11]



Obr. 1.6: Základná architektúra Sigfox technológie.[12]

Technológia Sigfox je na Slovensku zastrešená operátorom SimpleCell Networks Slovakia, A.S., kedy Sigfox pokrýva 87% územia a 92% populácie. Na Obr. A.1 je vyobrazená mapa pokrytia od spoločnosti SIMPLECELL NE-TWORKS SLOVAKIA.[11]



Obr. 1.7: Logo Sigfox Slovensko.[11]

1.3.2 LoRaWAN

LoRaWAN patrí podobne ako Sigfox technológia, ktorá je prevádzkovaná v bez licenčnom pásme ISM. Jedná sa o verejné pásma využívajúce pásma: 868 MHz pre Európu, 915 MHz pre Severnú Ameriku a 433 MHz pre Áziu. Na Slovensku sa využíva pre prenos 868 MHz pásma (863 - 870 MHz). Technológia LoRaWAN je pod záštitou LoRa Alliance. [9]

LoRaWan je možné rozdeliť na dva funkčné bloky:

- Prvým je Long Range (LoRa) modulácia. Jedná sa o moduláciu pracujúcu v rozprostrenom spektre využívajúci CSS moduláciu. Hlavným smerom pri vývoji bolo dosiahnutie čo najväčšej komunikačnej vzdialenosti.
- Druhým je LoRaWAN štandard, ktorý zaisťuje funkcionality linkovej vrstvy.

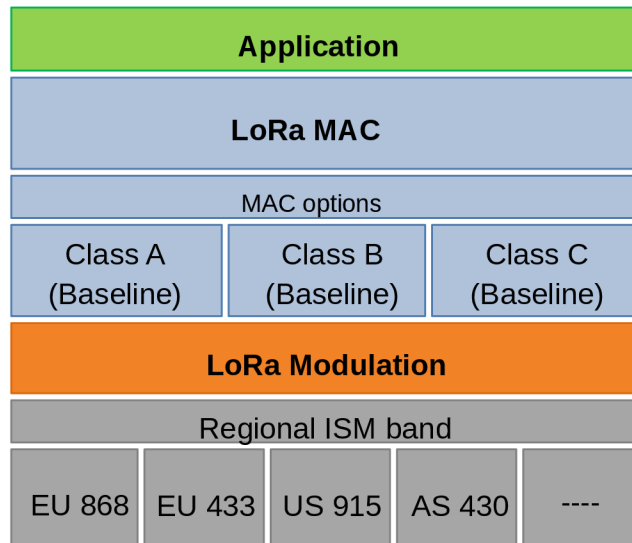
LoRaWan využíva 125 kHz (poprípade aj mimo Európu 250 a 500 kHz) šírku pásma v Európe. Maximálne prenosové rýchlosti, ktorých je možné dosiahnuť je 50 kbps pre oba smery s využitím FSK modulácie, teda pre Uplink aj pre Downlink. Utlm vyjadrený ako atakuje hodnotu 157 dB. [10]

Technológia poskytuje možnosť využitia plne Duplexného aj pol Duplexného módu. Latencia nadobúda hodnoty v rozsahu od 1 do 10 s. Teoretická životnosť zdroja energie pri zariadeniach pracujúcich v LoRaWAN technológií dosahuje hodnotu aj viacej ako 10 rokov. Maximálny povolený výkon je určený na hodnotu 14 dBm. [10]

Veľkosť správy je pre LoRaWAN technológiu určená hodnotou maximálne 243 bytov pre oba smery, teda pre Uplink taktiež aj pre Downlink. [9] Počet správ, ktoré je možné za deň preniesť je nie je na deň obmedzený.[9]

Podľa Obr. 1.8 vyplýva, že LoRaWAN disponuje tromi triedami zariadenia:

- Trieda A je základnou triedou, z ktorej následne vychádzajú aj triedy B a C. Využitie nachádza primárne v zariadeniach napájaných batériou a smerom prenosu orientovaného na Uplink.
- Trieda B je rozšírením triedy A, kedy narozdiel od nej umožňuje obojsmerný prenos. Pre správne fungovanie obojsmerného prenosu sa fyzické zariadenie synchronizuje pomocou synchronizačného rámca, ktorý je posielať Gateway.
- Trieda C je najviac orientované na obojsmerný prenos. Poskytuje možnosť maximálne možného prijímania dát v Downlinku (viacej ako tomu bolo v triede B). Zariadenie tak takmer neustále poslúcha pre prípad príjmu dát (okrem stavu keď dáta odosiela).



Obr. 1.8: Základná architektúra LoRaWAN technológie.[13]

Vzdialenosť na ktorú je možné zariadenie prevádzkovať sú rôzne, všeobecne však platí, že vo voľnej krajine je dosah približne na 50 - 70 km a v hustej mestskej zástavbe klesá na dosah približne na 1 až 3 km. [9]



Obr. 1.9: Logo LoRaWAN technológie.

Technológia LoRaWAN je na Slovensku zastrešená niekoľkými operátormi, ktorí sú vypísaný v Tab. 1.2 aj s ich mierou pokrytia touto technológiou. Na Obr. A.2 je vyobrazená mapa pokrytia od spoločnosti Antik.

<i>Operátor</i>	<i>Pokrytie</i>
Antik	viac ako 25 Miest po Slovensku (BA, KE)
Orange	Bratislava, Žilina, Banská Bystrica, Žiar nad Hronom, Šaľa, Košice, Zlaté Moravce a Veľký Šariš
Slovanet	57 lokalít vrátane všetkých krajských Miest a viac ako polovica okresných Miest

Tab. 1.2: Operátori prevádzkujúci technológiu LoRaWAN na Slovensku. [14]

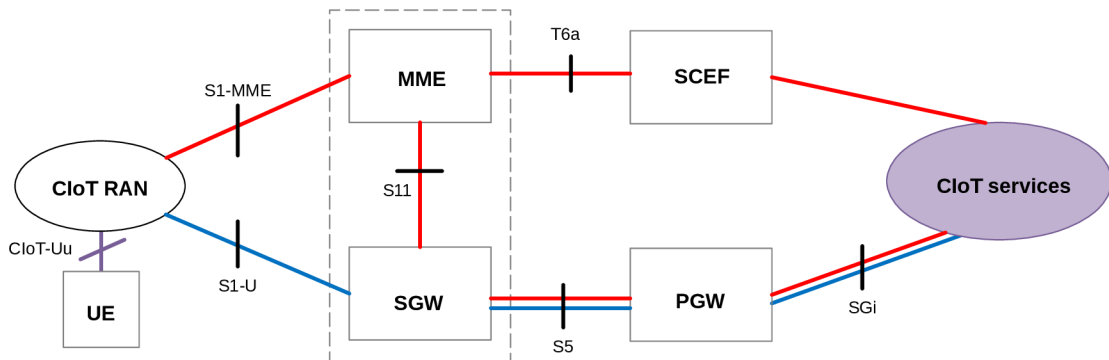
1.3.3 NB-IoT

Narrow Band Internet of Things technológia je prevádzkovaná v licenčnom pásme pod záštitou The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Jedná sa o technológiu využívajúcu súčasnú infraštruktúru 4G sietí (Rel. 10+). Výhodou tak je možnosť využitia už vybudovanej a funkčnej komunikačnej infraštruktúry. Pri svojej činnosti využíva (v strednej Európe) prevažne pásmo B20 (800 MHz), poprípade v pásma B3 (1800 MHz), B8 (900 MHz). [9]

NB-IoT technológia využíva pri prenose správ rôzne modulácie. Pri prenose v Uplinku využíva Frequency-Division Multiple Access (FDMA) moduláciu a pri Downlinku využíva Orthogonal Frequency - Division Multiple Access (OFDMA) moduláciu.[10]

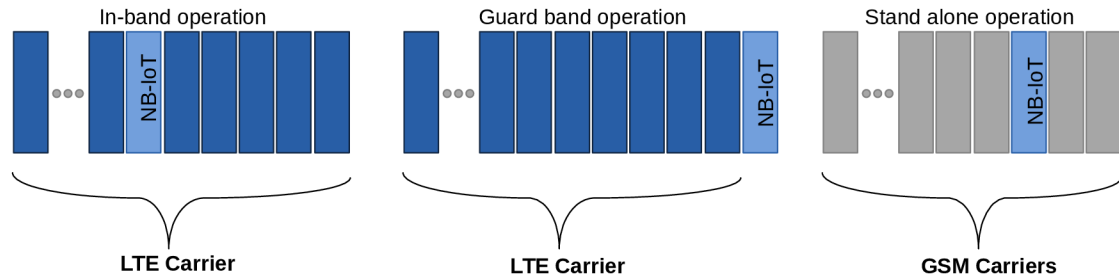
Technológia poskytuje možnosť využitia Half Duplex módu. Latencia nadobúda hodnoty v rozsahu od 1,6 do 10 s. Teoretická životnosť zdroja energie pri zariadeniach pracujúcich v NB-IoT technológií nadobúda hodnotu menej ako 10 rokov. Maximálny povolený výkon zo strany koncového zariadenia je určený na hodnotu 23 dBm. [10]

Veľkosť správy je pre NB-IoT technológiu určená hodnotou maximálne 1600 bytov pre oba smery, teda pre Uplink taktiež aj pre Downlink. [9] Počet správ, ktoré je možné za deň preniesť je nie je na deň obmedzený.[9] Pre fungovanie zariadenia typu NB-IoT je potrebná SIM karta. [11]



Obr. 1.10: Základná architektúra NB-IoT technológie.[15]

Vzdialenosť na ktorú je možné zariadenie prevádzkovať sú rôzne, všeobecne však platí, že vo voľnej krajine je dosah približne na 20 km a v hustej mestskej zástavbe klesá na dosah približne na 0,5 až 1,5 km. [9]



Obr. 1.11: Módy NB-IoT technológie.[16]

Z Obr. 1.11 je možné vyvodit, že technológiu NB-IoT je možné vďaka jej vlastnostiam (šírka pásma 180 kHz) prevádzkovať v troch rôznych modoch:

- Stand alone - využíva sa frekvenčné pásmo pre GSM siete.
- Guard band - využitie zdrojových blokov v rámci ochranného pásma dedikovaného rozsahu pre LTE.
- In-band - využitie zdrojových blokov v rámci LTE frekvenčného pásma.



Obr. 1.12: Logo NB-IoT technológie.

Technológia NB-IoT je na Slovensku zastrešená niekoľkými operátormi, ktorí sú vypísaný v Tab. 1.2 aj s ich mierou pokrytia touto technológiou. Na Obr. A.3 je vyobrazená mapa pokrytia od spoločnosti Slovak Telekom.

<i>Operátor</i>	<i>Pokrytie</i>
O2	neznámo
Slovak Telekom	75% územia a 88,5% populácie Slovenska

Tab. 1.3: Operátori prevádzkujúci technológiu NB-IoT na Slovensku. [14]

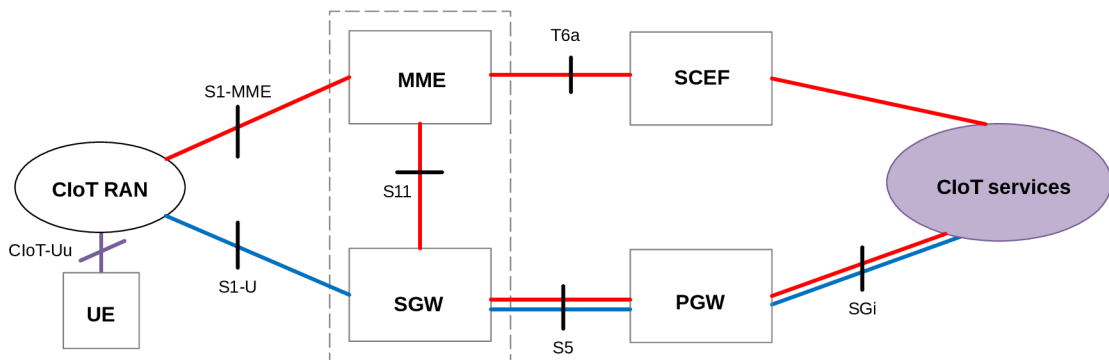
1.3.4 LTE Cat-M

Long Term Evolution for Machines technológia je rovnako ako NB-IoT prevádzkovaná v licenčnom frekvenčnom pásme a je pod záštitou 3GPP. Jedná sa o technológiu využívajúcu súčasnú LTE komunikačnú technológiu, hoci sa skôr uplatňuje využitie v GSM pásme. Výhodou tak je možnosť využitia už vybudovanej a funkčnej komunikačnej architektúry. Pri svojej činnosti využíva taktiež pásmo B20 (800 MHz). Technológia LTE Cat-M sa v súčasnosti využíva GSM siete a Stand alone operačný mód.[9]

LTE Cat-M technológia využíva pri prenose správ rôzne modulácie. Pri prenose v Uplinku využíva Single-carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) moduláciu a pri Downlinku využíva Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) moduláciu.[10]

Technológia poskytuje možnosť využitia Full Duplex aj Half Duplex módu. Latencia nadobúda hodnoty v rozsahu od 10 do 15 ms. Teoretická životnosť zdroja energie pri zariadeniach pracujúcich v LTE Cat-M technológií nadobúda hodnotu menej ako 10 rokov. Maximálny povolený výkon pre koncové zariadenie je určený na hodnotu 23 dBm. [10]

Hodnota veľkosti správy je rovnako maximálne 1600 bytov pre oba smery, teda pre Uplink taktiež aj pre Downlink. Počet správ, ktoré je možné za deň preniesť je nie je na deň obmedzený.[9] Pre fungovanie zariadenia typu LTE Cat-M je potrebná SIM karta. [11]



Obr. 1.13: Základná architektúra LTE Cat-M technológie.[15]

Vzdialenosť na ktorú je možné zariadenie prevádzkovať sú rôzne, všeobecne však platí, že vo voľnej krajine je dosah približne na 15 km a v hustej mestskej zástavbe klesá na dosah približne na 1 až 2 km. [9]

LTE Cat-M1 poskytujú dva Coverage Enhancement (CE) módy.

- CE mód A umožňuje až 32 opakovaní. CE mód A je základný mód. Uplatnenie je v mobilných zariadeniach.
- CE mód B umožňuje až 2048 opakovaní. Uplatnenie je v stacionárnych zariadeniach. [1]



Obr. 1.14: Logo LTE Cat-M technológie.

Technológia LTE Cat-M je na Slovensku zatiaľ zastrešená len operátorom Orange. Na Obr. A.4 je vyobrazená mapa pokrytia od spoločnosti Orange.

1.3.5 Porovnanie v súčasnosti dostupných technológií.

V nasledujúcej tabuľke Tab. 1.4 sú prehľadne porovnané najdôležitejšie vlastnosti v súčasnosti používaných technológií.

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT	LTE Cat-M1
Licencia	Nelicencované	Nelicencované	Licencované	Licencované
Šírka pásma	100 Hz	125 a 250 kHz	200 kHz	1,4 MHz
Dosah	<13 km	<20 km	<15 km	<1 km
Útlm	153 dB	157 dB	164 dB	156 dB
Prenosová rýchlosť v Uplinku	100 bps	50 kbps	250 kbps	<1 Mbps
Prenosová rýchlosť v Downlinku	600 bps	50 kbps	250 kbps	<1 Mbps
Latencia	1 - 30 s	1 - 10 s	1,6 - 10 s	10 - 15 ms
Duplex mód	Half Duplex	Full Duplex Half Duplex	Half Duplex	Full Duplex Half Duplex
Životnosť batérie	>10 rokov	<10 rokov	>10 rokov	>10 rokov
Maximálna veľkosť správy	12 bytov	243 bytov	1600 bytov	1600 bytov
Maximálny povolený vysielač výkon	14 dBm	14 dBm	23 dBm	20 dBm
Veľkosť správy UL	12 bytov	243 bytov	1600 bytov	1600 bytov
Veľkosť správy DL	8 bytov	243 bytov	1600 bytov	1600 bytov
Modulácia správy UL	DBPSK	CSS	FDMA	SC-FDMA
Modulácia správy DL	GFSK	CSS	OFDMA	OFDMA
Bezpečnosť	AES-128	AES-128	Využíva LTE Zabezpečenie	Využíva LTE Zabezpečenie
Cena zariadenia	<10 €	<5 €	<7 €	<3 €

Tab. 1.4: Porovnanie v súčasnosti dostupných technológií. [9], [10]

V nasledujúcej kapitole 2 bude bližšie popísaná vybraná technológia, ktorá má široké uplatnenie v IoT, konkrétne sa bude jednať o technológiu LTE Cat-M1.

Technológia LTE Cat-M1 bola vybraná na základe parametrov a vlastností, ktoré poskytuje pri jej nasadení v LPWA sieťach. Medzi jej výhody je možné zaradiť: nízku cenu zariadenia, poskytované prenosové rýchlosti latenciu a bezpečnosť vďaka základu z LTE technológie.

2 LTE Cat-M

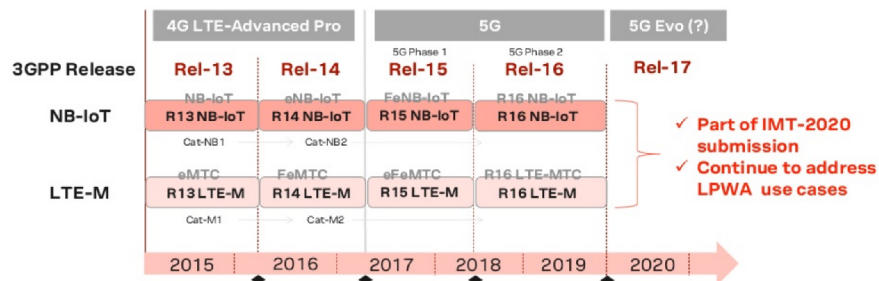
V nasledujúcej kapitole bude bližšie definovaná a charakterizovaná technológia LTE Cat-M, ktorá nachádza uplatnenie v IoT. V kapitole bude popísaná LTE Cat-M technológia, jej architektúra, bezpečnosť a využiteľnosť.

	LTE Cat-M1	LTE Cat-M2
Šírka pásma	1,4 MHz	5MHz
Prenosová rýchlosť v Uplinku	1 Mbps	7 Mbps
Prenosová rýchlosť v Downlinku	1 Mbps	4 Mbps
Modulácia správy UL	SC-FDMA	SC-FDMA
Modulácia správy DL	OFDMA	OFDMA
Duplex mód	Full Duplex Half Duplex	Full Duplex Half Duplex
Maximálny povolený vysielací výkon	23 dBm	23 dBm

Tab. 2.1: Porovnanie LTE Cat-M1 a LTE Cat-M2 technológie. [2], [17]

2.1 Popis LTE Cat-M technológie

Technológia LTE Cat-M1 bola špecifikovaná v 3GPP Release 13 a následne potom ďalšie verzie v nadchádzajúcich 3GPP Release 14 a 15. Jedná sa o modifikáciu súčasnej LTE technológie pre implementáciu v LPWA sieťach, pre možnosť pracovať v režime M2M komunikácie a v IoT. [1]



Obr. 2.1: Vývoj LTE Cat-M technológie a jej standardizovanie v 3GPP Release.[18]

Technológia LTE Cat-M ťaží z výhod LTE zabezpečenia pod tieto výhody tak spadá napríklad: [1]

- podpora identifikácie užívateľa,
- autentifikácia užívateľa,
- autentifikácia užívateľského zariadenia,
- integrita prenášaných údajov.

Z technológie LTE Cat-M a jej vlastností a výhod, ktoré táto technológia pri jej používaní prináša, tak v súčasnosti ťažia, poprípade v budúcnosti môžu ťažiť aplikácie typu: [1]

- sledovacích zariadení,
- chytrých miest,
- chytrých domácností,
- a ďalších typov aplikácií.

LTE Cat-M cieľi primárne na IoT aplikácie, na ktoré sú kladené nároky typu:[1]

- vyšších nárokov na dátové prenosy,
- nízkej energetickej náročnosti,
- nízkej latencie,
- možnosti operovať na veľké vzdialenosti.

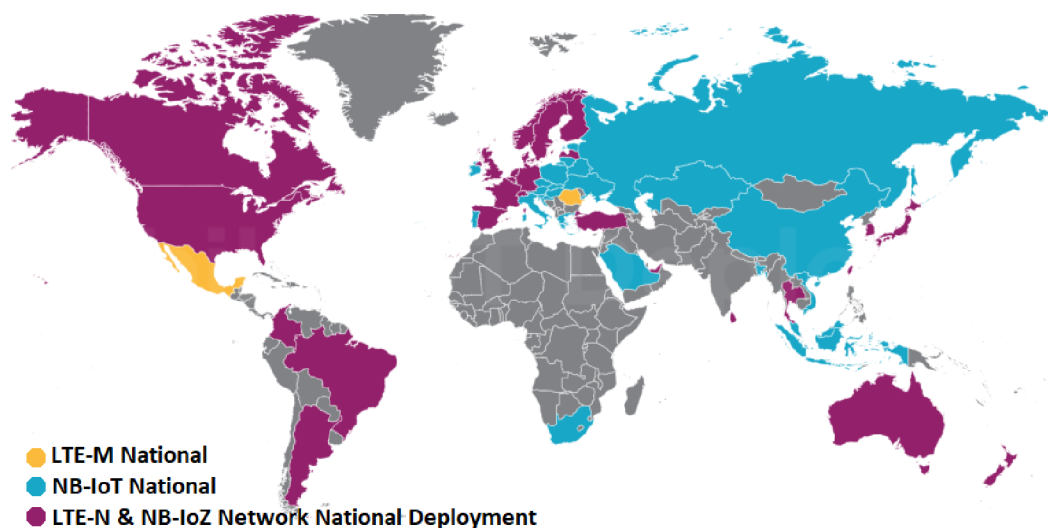
Okrem vyššie zmienených požiadaviek, ktoré sú kladené na LTE Cat-M je pri tejto technológii možnosť ťažiť z vlastností vyplývajúcich zo základu LTE technológie. Medzi výhody LTE Cat-M je tak možno zaradiť v prípade potreby podporu Voice over LTE (VoLTE).

2.2 Základná charakteristika LTE Cat-M1

Pri využití technológie LTE Cat-M1 je možno profitovať z jej základných vlastností a výhod, medzi ktoré patrí: [1]

1. vyššie prenosové rýchlosti (rádovo < 1 Mbps), čo prispieva k širokému spektru možných aplikácií, ktoré môžu byť prevádzkované pomocou LTE Cat-M1 technológie,
2. podpora pre veľké množstvo fyzických zariadení, ktoré môžu byť pripojené k jednej základovej stanici, rádovo sa môže jednať o 100 000 a viac fyzických zariadení (napr. v centre mesta),
3. lepšie vlastnosti pri komunikácii so zariadeniami, ktoré sa nachádzajú vo vnútorných priestoroch,

4. veľmi nízka energetická náročnosť, čo umožňuje prevádzkovať fyzické zariadenia aj na ťažko dostupných miestach, kedy pri využití ako napájacieho zdroja zariadenia je možné využiť napríklad AA batérie, v takomto prípade je možné dosiahnuť aj viac ako 10 ročnú prevádzku zariadenia s tak obmedzeným zdrojom energie,
5. využitie v aplikáciách s rôznymi požiadavkami na oneskorenie, od aplikácií s oneskorením dosahujúcou rádovo niekoľko sekúnd až po real-time aplikácie kedy kedy je požadovaná čo najnižšie oneskorenie rádovo v milisekundách,
6. nízka finančná náročnosť pri kúpe modulu,
7. kompatibilita s infraštruktúrou vybudovanou pre LTE a možnosť operácie LTE Cat-M v takto vybudovanej infraštruktúre (v súčasnosti sa využíva však GSM/EDGE),
8. vďaka základom z LTE je v určitých prípadoch možnosť využitia prenosu hlasu (VoLTE),
9. jednoduchý prechod pri nástupe 5G MTC technológie.

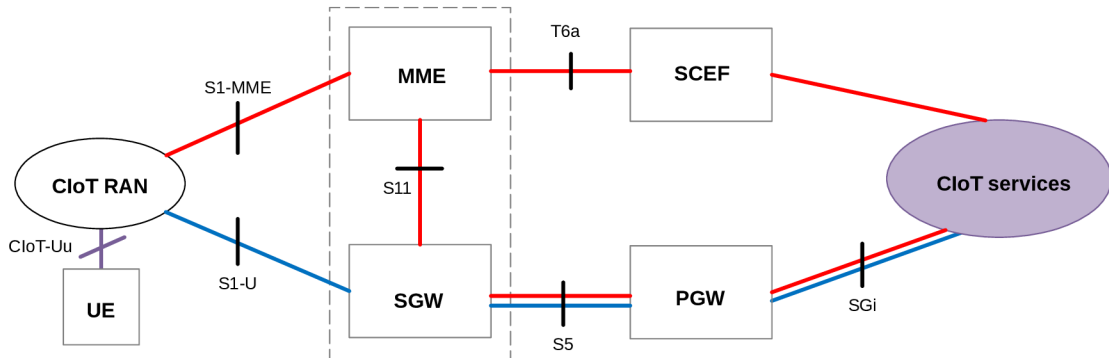


Obr. 2.2: Mapa s vývojom LTE Cat-M1 a NB-IoT technológie vo svete [19].

2.3 Architektúra LTE Cat-M1 technológie

Technológia LTE Cat-M1 spolu s technológiou NB-IoT majú veľmi analogickú, vychádzajúcu z v súčasnosti používanej infraštruktúry komunikačných systémů LTE / LTE Advanced (LTE-A).

Pretože LTE Cat-M1 architektúra vychádza z LTE technológie tak sa najskôr bližšie definuje LTE technológia a následne sa tieto základy rozširujú o funkčnosti a mechanizmy, ktoré umožňujú LTE Cat-M1 technológií mať vlastnosti, ktorými v súčasnosti disponuje. [1]



Obr. 2.3: Základná architektúra LTE technológie.[15]

Z Obr. 2.3 vyplýva, že medzi hlavné časti LTE technológie, ktoré zabezpečujú jej správne fungovanie je možné zaradiť.

1. Koncové zariadenie popripáde User Equipment (UE) jedná sa často o prenosné zariadenie, pomocou ktorého sa užívateľ pripája do bezdrôtovej siete. [1]
2. Základovú stanicu - Evolved Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Terrestrial Radio Access (eUTRAN), ktorú je možno definovať ako Radio Access Network (RAN) vysielateľ. Zabezpečuje rádiový prístup a správu pre koncové zariadenia (UE), ktoré sú pripojené ku základovej stanici. Pre svoju funkčnosť využíva rôzne typy frekvenčného multiplexu, pre uplink sa jedná o Single-Carrier FDMA (SC-FDMA) multiplex a pre downlink sa jedná o Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) multiplex. Využitie rozdielnych multiplexov je z dôvodu, že UL prenos je v IoT dôležitejší a rozdielnymi multiplexmi sa získa odlišenie jednotlivých prenosov. [1]
3. Evolved packet core (EPC) jedná sa o jadro LTE technológie, ktoré pre svoju funkčnosť v sebe zahŕňa ďalšie funkčné bloky: [1]
 - Mobility Management Entity (MME) - kľúčový riadiaci uzol pre prístupovú sieť LTE,
 - Serving Gateway (SGW) - slúži na smerovanie a preposielanie užívateľských dát (paketov),
 - Packet Data Network Gateway (PGW) - slúži k pripojeniu UE k externej packet data network (PDN) tým, že je miestom ich výstupu a vstupu,
 - Service Capability Exposure Function (SCEF) - slúži pre poskytovanie prostriedkov pre dôveryhodné identifikovanie služieb a schopností, ktoré

sú poskytované sieťou,

- Home Subscriber Server (HSS) - slúži pre správu mobility, podporu vytvárania hovorov a relácií, autentifikácia užívateľa a autorizácia prístupu,
- Access Network Discovery and Selection Function (ANDSF) - slúži k poskytnutiu informácií pre UE o dostupných prístupových sieťach v okolí a zdieľaniu pravidiel týchto sietí,
- Evolved Packet Data Gateway (ePDG) - slúži na zabezpečenie dátových prenos posielaných z UE cez nedôveryhodný prístup, kedy ePDG môže byť definovaný ako koncový uzol (IPsec) zriadených s UE.

EPC zabezpečuje riadenie, spracovávanie a samotný prenos rôznych typov užívateľských dát. Za EPC sa následne už nachádza ďalšia infraštruktúra sietí pre zabezpečenie prenosu dát ďalej až k cieľu, čo môže predstavovať konkrétny server s dátami konkrétného užívateľa. [1]

2.3.1 Mechanizmus pre rozšírenie pokrytia

Jednou výhodou LTE Cat-M technológie je schopnosť zvýšeného komunikačného dosahu v rámci prostredia. Jedná sa niekedy až o 7 násobne väčšie pokrytie ako tomu je pri LTE technológií. Realizácia tejto vlastnosti pre väčší dosah pokrytia signálom je umožnená využitím kombinácie rôznych techník:[1]

- zvýšenie výkonu dátových a referenčných signálov,
- opakovaný prenos pre riadiace a dátové kanály,
- požiadavky na pauzu medzi vysielaniami.

LTE Cat-M využíva pre dosiahnutie veľkého pokrytia signálom zosilnenie spektrálnej hustoty výkonu a opakovanie. Pri LTE Cat-M1 zariadeniach sa môžeme stretnúť s dvoma triedami napájania: Power Class 3 (23 dBm) a Power Class 5 (20 dBm). Pre LTE Cat-M2 až na hodnotu 14 dBm. S tým je spojená možnosť využiť zníženie výstupného výkonu až o 3 dB, čím sa znižujú náklady na zariadenie pri stálom zachovaní pokrytia.[1]

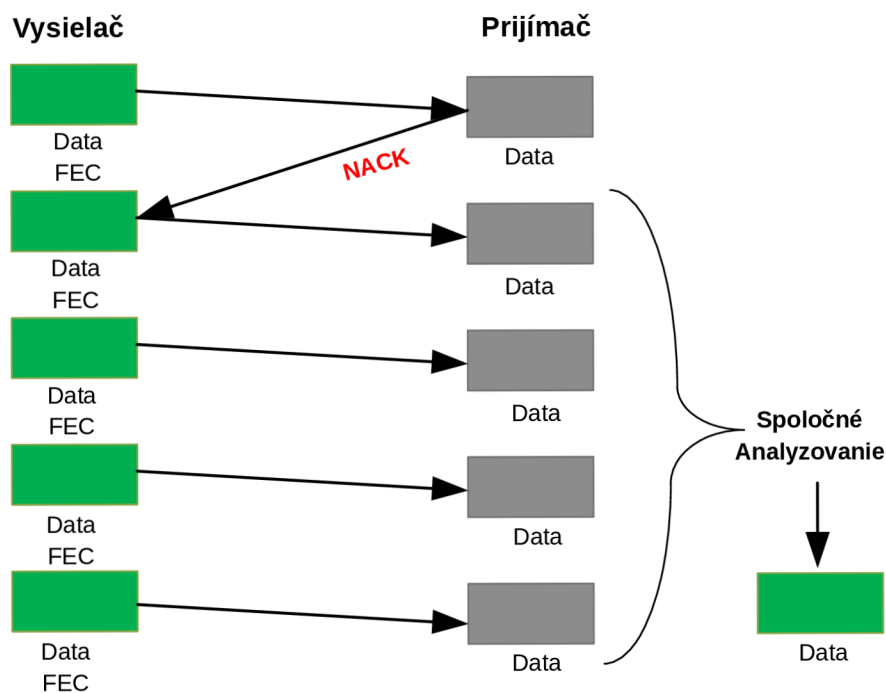
Pri využití opakovaných prenosov dát sa môže jednať:

- o viacnásobné odosielanie toho istého rámca pomocou zväzku Transmission Time Interval (TTI)
- o odosielanie rovnakých údajov počas určitého časového rámca.

Využitím jednej zo zmiených možností opakovaného odosielania dát sa výrazne zvyšuje možnosť, že prijímacie zariadenia správne prijme a dekoduje posielané dáta. Tým sa zlepšuje pokrytie v zlých podmienkach, poprípade na okrajoch bunky základovej stanice. [1]

Pri využití TTI zväzku sa neodosielajú chybné údaje s novou sadou kódových bitov, namiesto toho sa odosiela redundantné verzie rovnakej sady bitov v po sebe idúcich TTI zväzkoch vychádzajúcich z techniky obnovy paketov HARQ, príklad prenosu dát je na Obr. 2.4. TTI zväzok sa využíva v oboch smeroch vysielania v UL a DL. [1]

Využitie modulácie nižšieho rádu sa zvyšuje možnosť úspešnej detekcie prenášaných bitov. Konkrétne sa jedná o využitie Quadrature Phase-Shift -keying (QPSK) techniky namiesto 16 Quadrature amplitude modulation (QAM) techniky. Využitie QPSK má však aj negatívny dopad v podobe zníženia spektrálnej účinnosti (bps/Hz). Výsledkom tak je zmenšenie šírky pásma avšak dôležitejšie je pri IoT zvýšenie pokrytia v UL. [1]

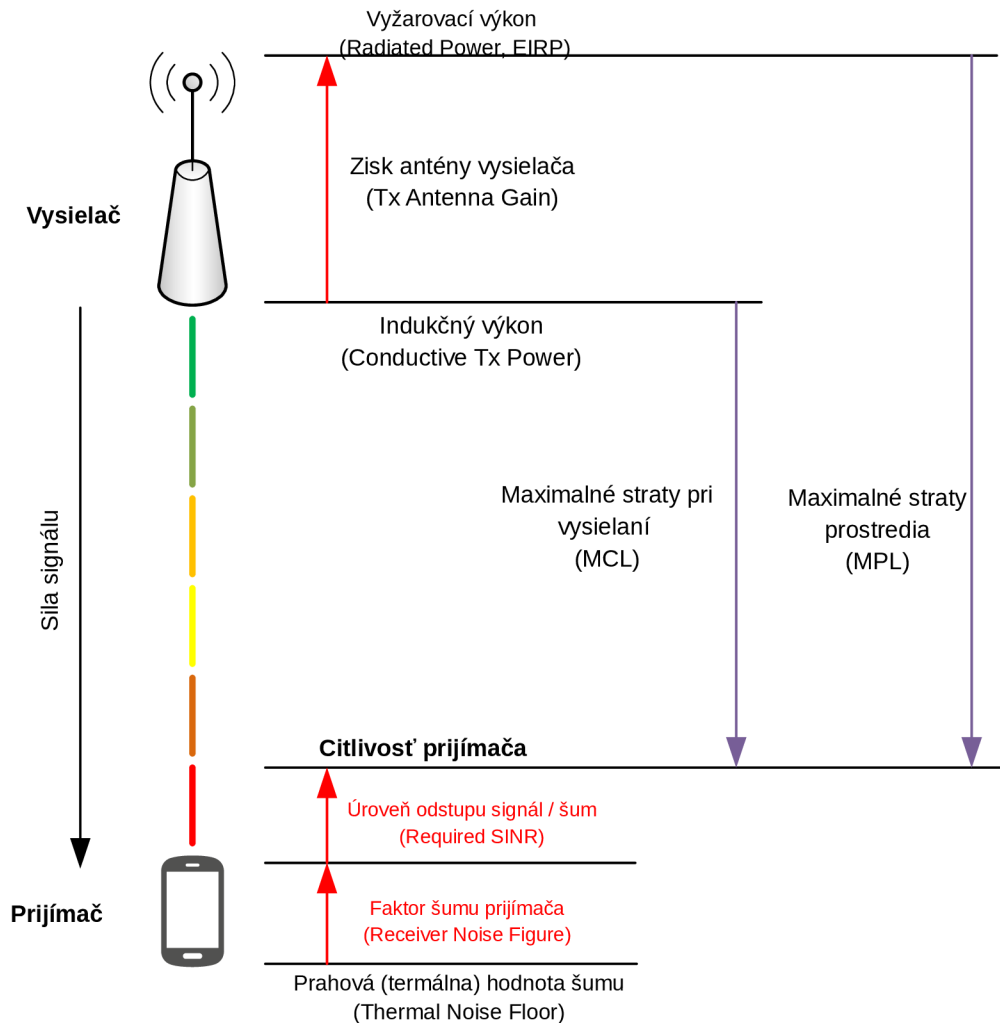


Obr. 2.4: Príklad prenosu dát v LTE Cat-M s využitím TTI zväzkov a obnovy paketov HARQ. [1]

Pri využití modulácie nižšieho rádu a opakovaného odosielania dát sa umožnilo pri LTE Cat-M1 technológii zvýšiť Maximum Coupling Loss (MCL) parameter na hodnotu 156 dB, čo je o 12 dB viac v porovnaní s LTE technológiou poskytujúcou 144 dB. Výsledkom tak je takmer sedem-násobné zvýšenie pokrytia. Rovnica 2.1 slúži k získaniu hodnoty MCL. [1]

$$MCL(dB) = P_{Tx} - (NoiseFigure + SINR + NoiseFloor) \quad (2.1)$$

Na Obr. 2.5 je znázornený MCL diagram pri prenose dát medzi základovou stanicou a fyzickým zariadením cez prostredie. Pri takomto prenose dochádza k útlmom v dôsledku vplyvu prostredia. [2]



Obr. 2.5: Maximum Coupling Loss diagram pre prenos dát medzi stanicou a zariadením cez prostredie. [2]

Z navýšenia MCL parametru získala LTE Cat-M1 technológia lepšie vlastnosti pri využití vo vnútorných priestoroch. A to, že zvýšenie MCL parametru poskytlo lepšiu priepustnosť signálu cez podlahy a steny budov. [1]

LTE Cat-M1 je možné prevádzkovať v Coverage Enhancement (CE) modoch: [1]

1. CE mód A poskytuje možnosť nastaviť až 32 opakovaní. Pri CE móde A sa jedná o základný mód, ktorý sa využíva napríklad v aplikáciách s potrebou mobility fyzického zariadenia.
2. CE mód B v porovnaní s CE modom A poskytuje väčšie pokrytie vďaka možnosti nastaviť až 2048 opakovaní. Nevýhodou je však oproti CE módu A a

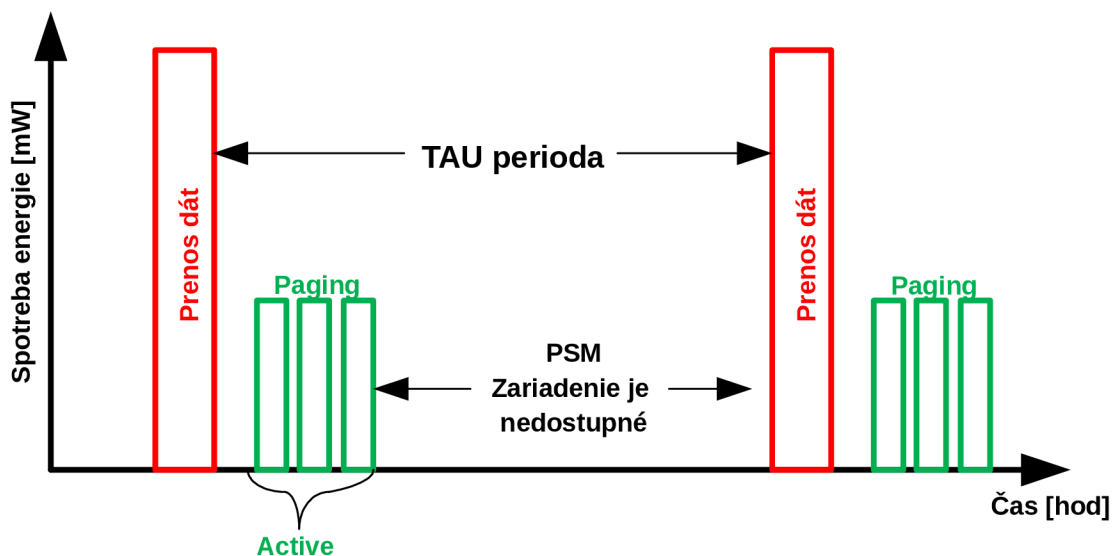
využitia veľkého počtu opakovaní vyššia latencia. Využitie nachádza pri fyzických zariadeniach, ktoré sú stacionárne a nachádzajú sa napríklad v budovách.

2.3.2 Mechanizmus pre šetrenie energie zariadenia

Šetrenie energie fyzického zariadenia je v veľmi dôležité vo využití v IoT. Cieľom je aby sa so šetrením energie a využití batérií ako zdroja energie fyzických zariadení dosiahla, čo najväčšia dĺžka životnosti batérie (ideálna by bola výdrž batérie okolo 10 rokov).

Power Saving Mode

V súčasnosti sa na šetrenie energie využíva Power Saving Mode (PSM). PSM využíva techniky, kedy sa maximalizuje doba medzi posielením Periodic Tracking Area Updates (pTAU), ohlasovaním stavu zariadenia do siete. Pri PSM je možné komunikačný modul prepnúť do hibernujúceho stavu počas doby, kedy sa neprenášajú dáta. [20]



Obr. 2.6: Základné fungovanie PSM mechanizmu pre šetrenie energie. [1]

PSM disponuje dvoma časovačmi. [20]

- T3324 Active Timer - definuje čas počas, ktorého je zariadenie v Active / IDLE móde. Poskytuje dva druhy nastavenia časovača.

Nižšia nastavená hodnota časovača poskytuje väčšiu úsporu energie vďaka možnosti skoršieho prechodu do hibernujúceho stavu.

Vyššia nastavená hodnota časovača poskytuje dlhší časový úsek umožňujúci komunikáciu zariadenia a servera.

Výhodou T3324 je možnosť nastavenia hodnoty časovača, ktorá najlepšie vyhovuje užívateľským požiadavkám.

- T3412 Timer - definuje čas medzi vysielaním pTAU rámca, v ktorom zariadenie ohlasuje, že je stále pripojené do siete.

V 3GPP Release 13 sú definované odporúčané hodnoty T3412 časovača nasledovne: [20]

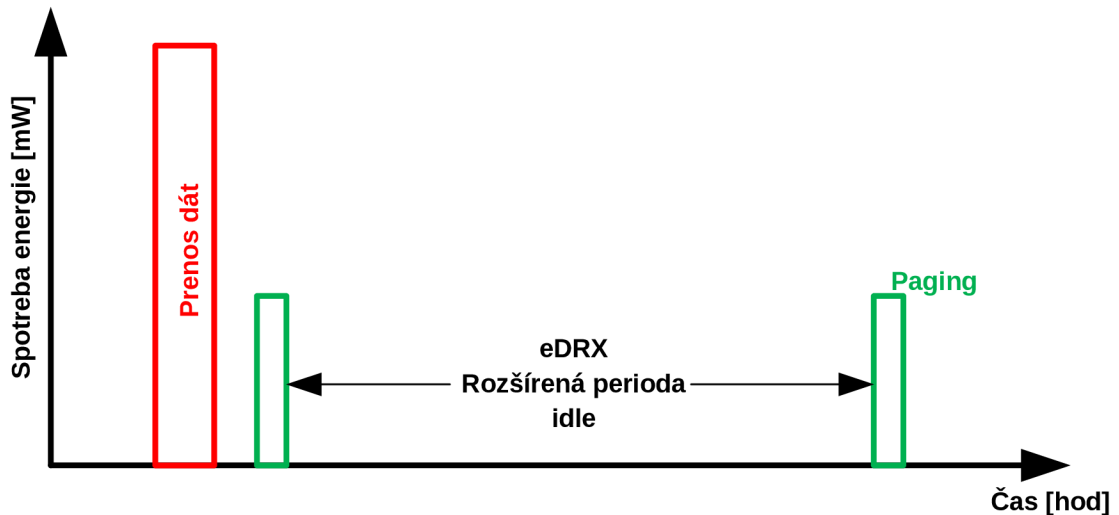
- minimálna hodnota časovača môže byť nastavená na hodnotu 4 hodiny,
- maximálna hodnota časovača môže byť nastavená až na hodnotu 413 dní.

Tieto hodnoty sú však odporúčané a je ich možné meniť. V takom prípade je však potrebné túto zmenu hraničných hodnôt zaniest aj do siete. [20]

eDRX

Extended Discontinuous Reception (eDRX) je rozšírením existujúcej Discontinuous Reception mechanism (DRX) techniky, ktorá sa v súčasnosti využíva v LTE technológií k dosiahnutiu úspory batérie v mobilných zariadeniach. [20]

eDRX je primárne určená pre využitie v IoT. Základom eDRX je predĺženie času, kedy zariadenie takzvané nepočáva sieť, teda stav kedy je zariadenie pre sieť nedostupné. Využitím eDRX je potrebné počítať s nevýhodou v podobe stavu, keď je zariadenie pre sieť nedostupné. Výhodou však je úspora energie a s tým súvisiace predĺženie životnosti batérie, ktorá je v IoT žiadaná. [20]



Obr. 2.7: Základné fungovanie eDRX mechanizmu pre šetrenie energie. [1]

eDRX cyklus určuje základnú dosiahnuteľnosť zariadenia v DL. eDRX je možné nakonfigurovať pomocou Paging Transmission Window (PTW), ktoré určuje spoľahlivosť dosiahnuteľnosti zariadenia sieťou. Zariadenie je schopné v prípade potreby kedykoľvek začať vysielanie dáta bez ohľadu ako je eDRX nastavené. [20]

V 3GPP Release 13 sú definované odporúčané hodnoty eDRX cyklu nasledovne: [20]

- minimálna hodnota eDRX cyklu môže byť nastavená na hodnotu 5,12 sekundy,
- maximálna hodnota eDRX cyklu môže byť nastavená na hodnotu 43,69 minút.

Využitie kombinácie eDRX a PSM techniky

Pre LTE Cat-M technológiu sa odporúča aby boli podporované oba spôsoby šetrenia energie teda PSM aj eDRX technika. Následnou výhodou je benefit jednotlivých techník, následne potom využitie kombinácie oboch techník.

Pri využití kombinácie oboch techník je možné získať dlhú životnosť batérie. Je však potrebné správne nastavenie konfiguračných parametrov oboch techník (časovačov pri PSM a eDRX cyklu) pri spoločnom využití aby nedošlo k stavu kedy je zariadenie pre sieť úplne nedostupné. [20]

2.4 Frekvenčné pásma pre LTE Cat-M

Frekvenčné pásma, v ktorých LTE Cat-M technológia pracuje boli definované v 3GPP Release 13 a následne ešte v 3GPP Release 14.

V 3GPP Release 13 bolo definovaných 19 frekvenčných pásem, ktoré nachádzajú uplatnenie pri LTE Cat-M technológií. Konkrétne sa jedná o pásma: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 26, 27, 28, 31, 39. V nasledujúcom 3GPP Release 14 boli pridané ešte dve frekvenčné pásma pre využitie v LTE Cat-M. Jednalo sa o pásma: 25 a 40.

Pre dosiahnutie globálnej podpory frekvenčných pásiem bolo z hore zmienených pásiem vybratých konkrétnych 11 pásiem. Toto zjednotenie využívaných pásiem má výhodu v jednotných moduloch schopných operovať na území Severnej Ameriky, Južnej Ameriky, Európy a časti Ázie. Medzi využívané pásma v týchto lokalitách bolo vybrané pásma: 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13, 20, 25, 26 a 28. [20]

Pásmo	Duplex mód	Frekvencia [MHz]	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]	Šírka kanálu [MHz]
1	FDD	2100	1920 - 1980	2110 - 2170	5; 10; 15; 20
3	FDD	1800	1710 - 1785	1805 - 1880	1,4; 3; 5; 10; 15; 20
7	FDD	2600	2500 - 2570	2620 - 2690	5; 10; 15; 20
8	FDD	900	880 - 915	925 - 960	1,4; 3; 5; 10
20	FDD	800	832 - 862	791 - 821	5; 10; 15; 20
42	TDD	3500	3400 - 3600	3400 - 3600	5; 10; 15; 20
72	FDD	450	451 - 456	461 - 466	1,4; 3; 5

Tab. 2.2: Tabuľka jednotlivých pásiem a ich frekvenčného rozsahu pre UL a DL [2].

2.5 Fyzická vrstva

V tejto časti bude popísaná LTE Cat-M fyzická vrstva. Bližšie budú popísané kanály v LTE Cat-M technológií. Pri LTE Cat-M je potrebné dodržať požiadavky, že LTE Cat-M technológia poskytuje: nízku cenu zariadenia, veľké pokrytie a dlhú životnosť batérie. [2]

Ako už bolo spomenuté v kapitole 2.3, LTE Cat-M (rovnako ako NB-IoT) vychádza a rozširuje existujúcu LTE fyzickú vrstvu s funkcionalitami pre podporu fungovania v IoT. [2]

Základné prenosové modely v UL a DL sú rovnaké ako tomu je v LTE. V UpLink-u využíva SC-FDMA moduláciu a v DownLink-u využíva OFDM. [2]

Výhodou základných vlastností LTE a LTE Cat-M technológií je možnosť prenosu dát (LTE užívateľa a LTE Cat-M užívateľa) prevádzkovať v rámci jednej LTE bunky (napríklad pri mobilnom zariadení a mobilnými širokopásmovými modemami). [2]

Základné požiadavky, ktoré požaduje IoT technológia sú zabezpečené implementáciou zmien v porovnaní s LTE fyzickou vrstvou. Medzi tieto zmeny patrí: [2]

- znížením vysielacej a prijímacej šírky pásma a ďalšími zjednodušeniami sa znížila cena zariadenia,
- vďaka opakovanému odosielaniu dát je zaručené veľké pokrytie,
- znížením počtu kontrolných signálov je zaručená dlhšia životnosť batérie.

LTE Cat-M využíva rovnako ako LTE Primary Synchronization Signal (PSS), Secondary Synchronization Signal (SSS), a hlavnú časť Physical Broadcast Channel (PBCH), ktorý nesie Master Information Block (MIB). Z E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number (EARFCN) je možné získať informáciu o absolútnej frekvencii, okolo ktorej sú sústredené LTE a LTE Cat-M technológie. [2]

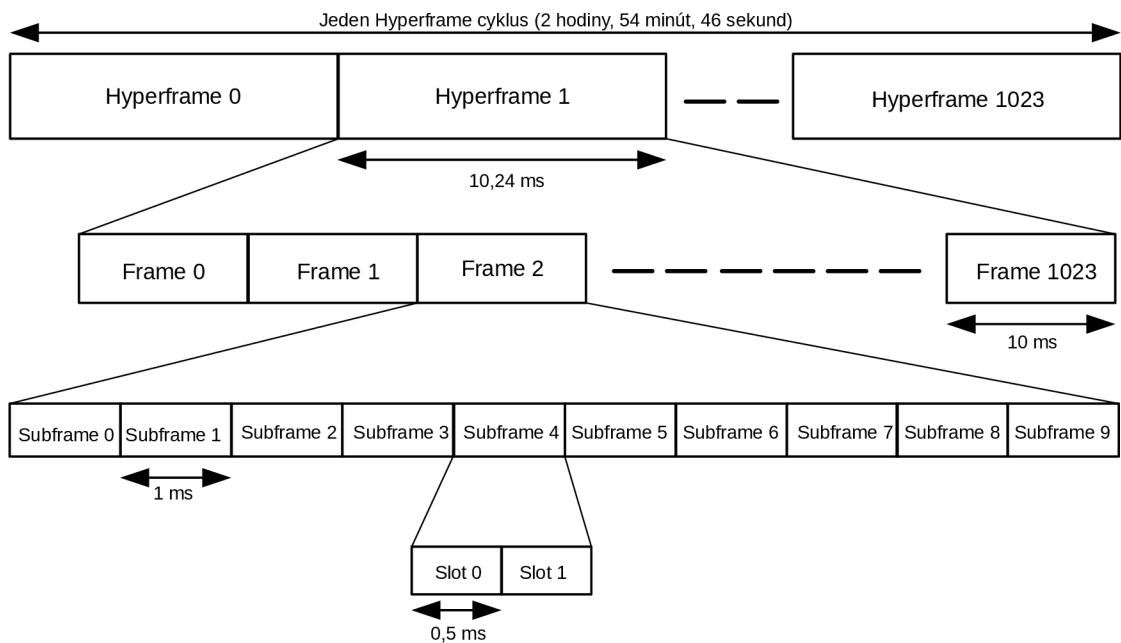
Medzi rozdiely v LTE Cat-M technológii je možné zaradiť:

- Rozdielny počet Physical Resource Blocks (PRBs) bližšie popísané v časti 2.5.2.
- Úzko pásmový prenos a jeho umiestnenie v šírke pásma LTE technológií je bližšie popísaný v časti 2.6.2.

2.5.1 Štruktúra rámca

Na Obr. 2.8 je znázornená časová štruktúra rámca na prístupovej vrstve LTE a LTE Cat-M. Ako vyplýva z Obr. 2.8 na najvyššej úrovni je hyper cyklus, ktorý pozostáva z 1024 hyper rámcov. Následne každý hyper rámec pozostáva z 1024 rámcov. Jeden rámec je zložený z 10 sub rámcov, kedy každý sub rámec je rozdelený do dvoch slotov, kedy každý slot má dĺžku 0,5 ms. [2]

Každý slot potom môže pozostávať zo 7 OFDM symbolov pre normálny stav, teda normálnu dĺžku Cyclic Prefix (CP), kedy je hodnota oneskorenia je 4,7 μs . V prípade extended CP kedy je hodnota oneskorenia je až 16,7 μs , pozostáva každý slot zo 6 OFDM symbolov. [2]



Obr. 2.8: LTE Cat-M a LTE štruktúra rámca. [2]

Každý zo sub rámcov je možné presne identifikovať vďaka identifikátorov: [2]

- hyper system frame number (H-SFN), ktorého rozsah je 0 až 1024,
- system frame number (SFN), ktorého rozsah je 0 až 1024,
- subframe number (SN), ktorého rozsah je 0 až 9.

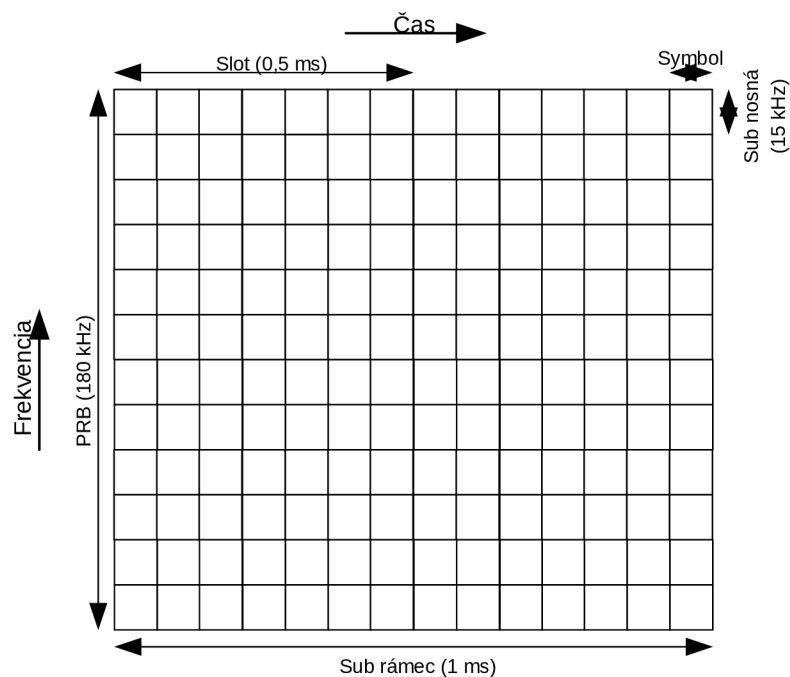
Pri ďalšom postupe sa bude uvažovať o normálnej hodnote CP ($4,7 \mu s$), pretože nachádza väčšie uplatnenie v koncovom nasadení. [2]

2.5.2 Zdrojová mriežka

Na Obr. 2.9 je znázornená najmenšia zdrojová jednotka, ktorá pozostáva z jedného páru Physical resource block (PRB). Pri normálnej hodnote CP ($4,7 \mu s$) zodpovedá 12 sub nosným so 14 OFDM symbolmi. Pre Uplink a Downlink je možné nastaviť 15 kHz spacing. Pre Uplink samostatne je potom možné nastaviť spacing na hodnotu 3,75 kHz a 15 kHz. [2]

Jeden Physical resource block je definovaný 12 sub nosnými s rozstupom 15 kHz z čoho vyplýva, že jeden PRB je definovaný šírkou 180 kHz.

Okrem PRB je možné sa ešte stretnúť s menšou veľkosťou zdrojovej jednotky, ktorá je definovaná ako Resource Element (RE). Jeden RE zodpovedá jednej sub nosnej v jednom OFDM symbole. [2]



Obr. 2.9: Jeden pár Physical resource block v LTE a LTE-M technológií. [2]

2.6 Mechanizmy zaisťujúce prenos dát

Mechanizmy zaisťujúce prenos sú zhodné tým, ktoré sa využívajú v DL a UL v LTE technológií. Bližšie špecifikované spoločné vlastnosti sú popísané v úvode Kapitoly 2.5.

Pri DL je jednosmerný prúd sub nosnej umiestnený uprostred šírky pásma systému. Podporované sú oba typy CP.

2.6.1 Duplex mód

Zariadenia môžu pracovať vo Full-Duplex móde (FD) alebo v Half-Duplex móde (HD). LTE Cat-M podporuje prevádzku duplexu s využitím frequency-division duplex (FDD), kedy sú využité dve nosné frekvencie jedna pre UL a druhá pre DL. Okrem FDD podporuje LTE Cat-M taktiež time-division duplex (TDD) mód. [2]

V prípade, keď zariadenie pracuje vo Full-Duplex FDD (FD-FDD) móde je zariadenie schopné prijímať a vyslať dáta v rovnakom čase. V prípade, kedy zariadenie pracuje v Half-Duplex FDD (HD-FDD) je zariadenie nútené sa prepínať medzi príjmom (pre príjem dát) a odosielaním (pre odosielanie dát). [2]

Zariadenie podporujúce iba HD-FDD mód môže pracovať v dvoch operačných typoch: [2]

- Typ A je schopný rýchleho prepínania medzi typom prenosu v smere UL a DL. Pre každý typ prenosu je k dispozícii oscilátor pre generovanie nosnej frekvencie.
- Typ B využíva sa najmä pre LTE Cat-M zariadenia, kedy pri požiadavke na nízku cenu zariadenia sa využíva iba jeden oscilátor pre oba typy prenosov (pre UL aj pre DL). Pri zmene typu prenosu z UL na DL alebo z DL na UL sa vkladá takzvaný guard subframe, ktorý poskytujú zariadeniu čas na preladenie nosnej frekvencie.

V prípade, keď zariadenie pracuje v TDD móde sú využité rovnaké nosné frekvencie pre oba typy prenosov (pre UL aj pre DL). Z Tab. 2.3 vyplýva rozdelenie normálnych sub rámcov v rámci, následne potom závislých UL a DL sub rámcov podľa špecifickej konfigurácie UL-DL prenosu podľa tabuľky.

Prechod z DL do UL počas guard periódy využíva špeciálny sub rámec, ktorý je v Tab. 2.3 označený symbolom "S". Symboly pred guard periódou sú určené pre DL príjem dát a symboly po guard perióde sú určené pre UL odosielanie dát. [2]

UL - DL Konfigurácia	Číslo sub rámca									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	DL	S	UL	UL	UL	DL	S	UL	UL	UL
1	DL	S	UL	UL	DL	DL	S	UL	UL	DL
2	DL	S	UL	DL	DL	DL	S	UL	DL	DL
3	DL	S	UL	UL	UL	DL	DL	DL	DL	DL
4	DL	S	UL	UL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
5	DL	S	UL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
6	DL	S	UL	UL	UL	DL	S	UL	UL	UL

Tab. 2.3: UL-DL konfigurácia pre TDD mód v LTE a LTE Cat-M. [2]

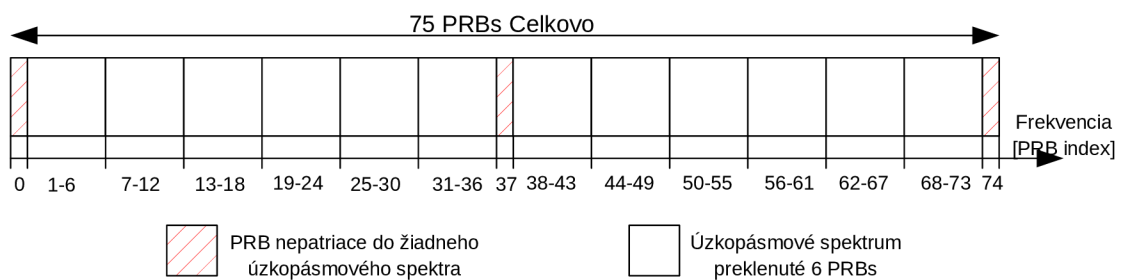
LTE Cat-M zariadenia sú schopné implementovať a využívať všetky vyššie zmienené techniky. Výhodou tak je možnosť nastaviť fungovanie zariadenia podľa požiadaviek kladených na jednotlivé aplikácie.

2.6.2 Prenos v úzko pásmovom spektre

Pri LTE technológií sú podporované šírky pásma o hodnote 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz spolu s ochranným pásmom. Maximálny počet PRBs, ktorý je možné dosiahnuť je 100 PRBs alebo 18 MHz. Pre dosiahnutie maximálneho počtu PRBs je potrebné zníženie guard pásma [2].

Pri LTE Cat-M technológií je možné využiť zariadenia, ktorým postačuje využitie obmedzenej šírky pásma pre príjem a odosielanie dát. Najjednoduchšie zariadenia podporujú maximálny počet kanálov šírky pásma s hodnotou 6 PRBs. Na Obr. 2.10 je znázornená alokácia zdrojov pre LTE Cat-M zariadenia, kedy sa využíva neprekývajúce sa úzko-pásmové spektrum s hodnotou 6 PRBs a systém s 15 MHz šírkou pásma.

Pri všetkých šírkach pásma (s výnimkou najmenšieho) nie je možné rovnomerne rozdeliť šírku pásma na menšie úzko-pásmové spektrum. Táto skutočnosť je z dôvodu, že niektoré PRBs nie sú súčasťou pásma. [2]



Obr. 2.10: Využitie úzko-pásmového spektra v 15 MHz LTE systéme. [2]

V prípade, keď systém s určitou šírkou pásma nemá parný počet PRBs nastáva stav, keď PRB nie je súčasťou žiadneho úzko-pásmového spektra. Zbytky týchto nevyužitých PRBs sú následne rovnomerne rozložené v okraji šírky pásma systému. [2]

V Tab. 2.3 je vypísaný počet úzko-pásmových spektier, počet PRBs a počet PRBs, ktoré nie sú súčasťou žiadneho úzko-pásmového spektra.

Šírka pásma spolu s guard pásmom [MHz]	Celkový počet PRBs v šírke pásma [-]	Celkový počet úzko-pásmových spektier [-]	Celkový počet PRBs nepatriace do žiadneho úzko-pásmového spektra [-]
1,4	6	1	žiadne celkovo 0
3	15	2	1 na každej strane + jedno v strede celkovo 3
5	25	4	1 v strede celkovo 1
10	50	8	1 na každej strane celkovo 2
15	75	12	1 na každej strane + jedno v strede celkovo 3
20	100	16	2 na každej strane celkovo 4

Tab. 2.4: LTE Cat-M úzko-pásmové spektrá v jednotlivých šírkach pásiem. [2]

PRBs, ktoré nie sú súčasťou žiadneho úzko-pásmového spektra nie je možné využiť pre prenos v LTE Cat-M fyzických kanáloch: [2]

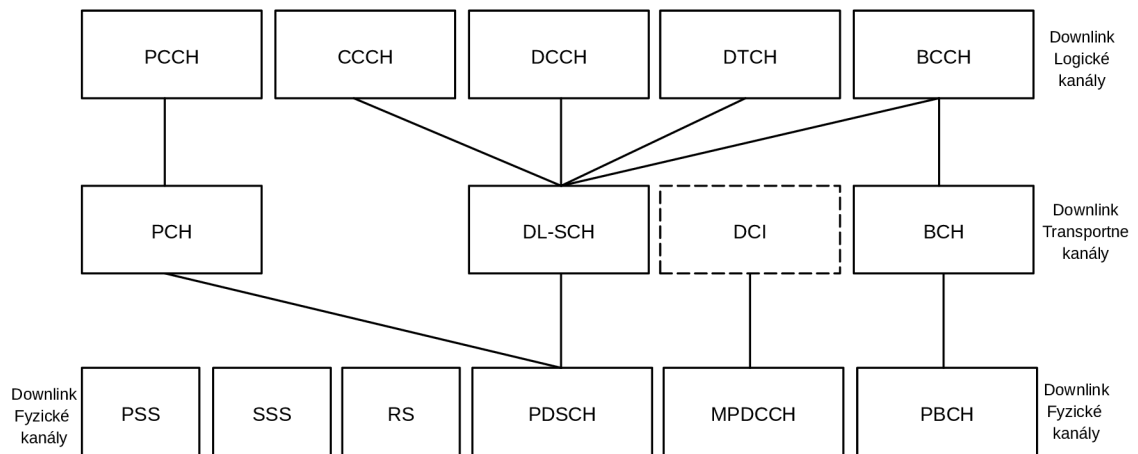
- MTC Physical Downlink Control Channel (MPDCCH),
- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH),
- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH).

Avšak je tu možnosť využitia týchto PRBs pre LTE Cat-M prenos na iných fyzických kanáloch (signáloch) a taktiež pre každý LTE prenos. Preto je podporované aj preskakovanie frekvencií fyzických kanálov a signálov pre zaistenie dobrej frekvenčnej diverzity (aj pre zariadenia s redukovanou šírkou pásma). [2]

2.7 Spôsob prenosu dát v Downlink-u

LTE Cat-M disponuje paletou DL kanálov a signálov znázornené sú na Obr. 2.11. Fyzická vrstva poskytuje mechanizmy pre prenos dát k vyšším vrstvám pomocou transportných kanálov prostredníctvom Medium Access Control (MAC) vrstvy. [2]

Downlink Control Information (DCI) zobrazený na Obr. 2.11 nepatrí k transportným kanálom. Nasledujúca časť sa bude bližšie zaoberať DL fyzikálnymi kanálmi a signálmi. PSS, SSS, a PBCH sú periodicky odosielené v strede LTE nosnej. MPDCCH a PDSCH sú posielané v úzko-pásmovom spektre. Downlink Reference Signals (RS) sú odosielené v každom PRBs. [2]



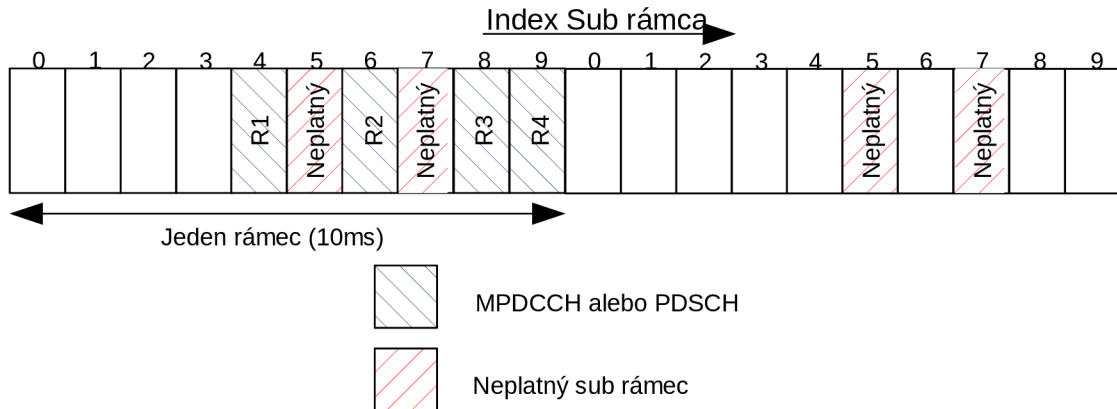
Obr. 2.11: Downlink kanály a signály v LTE Cat-M. [2]

2.7.1 Downlink sub rámec

V SI rámci je možné vysielat bit-mapový sub-rámec, ktorý v DL označuje platné rámce pre prenos v LTE Cat-M. Bit- mapa môže nadobúdať veľkosť v rozsahu od 10 do 40 bitov, čo odpovedá sub rámcu vrámci 1 až 4 rámcov. Sieť je schopná pomocné sub rámce v DL označiť ako Positioning Reference Signal (PRS) alebo Multimedia Broadcast Multicast Service Single Frequency Network (MBSFN), ktoré nie sú platné pre prenos v LTE Cat-M technológií.

Na Obr. 2.12 je znázornený príklad 10-bitového LTE Cat-M bit-máp sub rámca. Z obrázka vyplýva, že sub rámec #5 a #7 boli označené ako neplatné pre prenos v LTE Cat-M.

DL prenos (MPDCCH or PDSCH) rámca podľa obrázka začína v sub rámci #4. V prípade, keď by nebol žiaden súb rámec označený ako neplatný tak by opakovania prebiehali v sub rámcach #4, #5, #6 a #7. Keď však boli sub rámce #5 a #7 označené ako neplatné pre prenos tak opakovania boli naviazané na platné sub rámce #4, #6, #8 a #9. LTE Cat-M technológia pri svojej činnosti využíva len časť RE sub rámca z LTE technológií. [2]



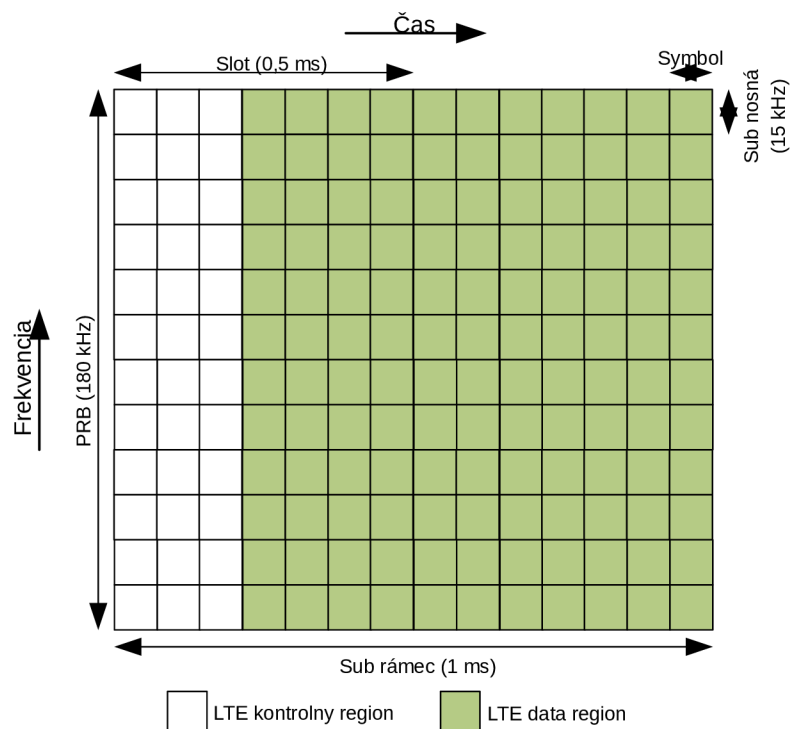
Obr. 2.12: LTE Cat-M sub rámec - bit-mapa. [2]

Na Obr. 2.13 je znázornená štruktúra LTE sub rámca v DL. Štruktúra sub rámca sa skladá z kontrolnej časti a dátovej časti. LTE kontrolná časť sa skladá z jedného (a viacej) OFDM symbolov umiestneným v začiatku sub rámca. Zbytok sub rámca sa skladá z dátovej časti, kde sú umiestnené ostatné OFDM symboly. [2]

V LTE sú takmer všetky riadiace signály ako je: Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH), Physical Downlink Control Channel (PDCCH), a Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel (PHICH) mapované v kontrolnej časti sub rámca. V dátovej časti je mapovaný iba jeden riadiaci signál a to PDSCH. Všetky riadiace signály patria medzi široko pásmové kanály a môžu zaberat takmer celú šírku pásma, čo môže byť až 20 MHz. [2]

Pri LTE Cat-M technológií sa však v dôsledku požiadavky na opakovaný prenos a využívanie úzko-pásmového spektra nevyužívajú široko-pásmové kanály. LTE Cat-M kontrolný kanál (MPDCCH) je potom mapovaný v dátovej časti. MPDCCH kanál vychádza z Enhanced Physical Downlink Control Channel (EPDCCH) kanálu z LTE, ktorý bol uvedený v 3GPP Release 11. Umiestnením (MPDCCH) kanálu sa predchádza možnej kolízii medzi LTE a LTE Cat-M kontrolnými kanálmi. Následne sú potom oboje kanály, teda kontrolný kanál (MPDCCH) a dátový kanál (PDSCH) mapované v dátovej časti. [2]

V LTE Cat-M technológií je prvotný symbol pre MPDCCH/PDSCH prenos vysielaný v SI rámci. Zvyčajný počet vysielaných kontrolných symbolov je jeden, v prípade potreby viacej ako jedného kontrolného symbolu je potrebné posunúť prvotný symbol aby sa zamedzilo kolízii medzi LTE a LTE Cat-M. Prvotný symbol v LTE Cat-M je možné umiestniť na 2, 3 a 4 symbol sub rámca. Pri najnižšej šírke pásma, ktorá ma hodnotu 1,4 MHz sa prvotný symbol posúva na 3, 4 a 5 symbol sub rámca. V prípade využitia TDD techniky (viz. sekcia 2.6.1) sa prvotný symbol najneskôr na 3 symbol sub rámca a to z dôvodu PSS/SSS signálov. [2]



Obr. 2.13: Štruktúra DL sub rámečka v LTE. [2]

LTE Cat-M pri zmene z jedného úzko-pásmového spektra (DL) na prvom sub rámeči do iného úzko-pásmového spektra (UL) na druhom sub rámeči využíva "guard period for narrowband retuning". V tomto stave zariadenie neprijíma prvé dva OFDM symboly v druhom sub rámeči. Tieto zmeny spadajú čisto do kontrolnej časti LTE sub rámečka vďaka čomu má takáto zmena minimálny, dokonca žiaden vplyv na prenos v LTE Cat-M. [2]

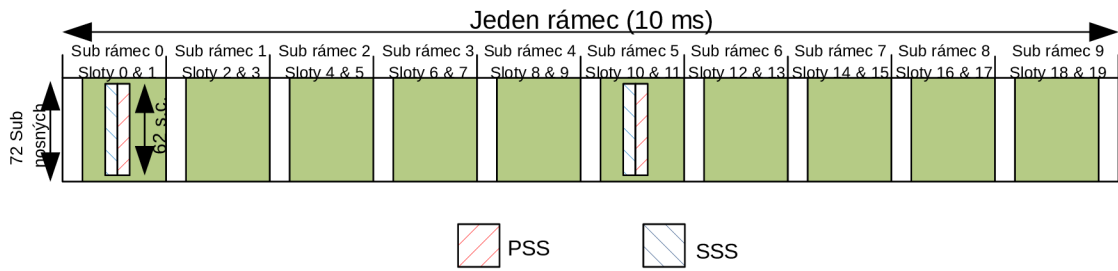
2.7.2 Typy synchronizačných signálov v DL

LTE Cat-M zariadenia pri svojej činnosti využívajú techník z LTE technológie. Využíva PSS a SSS pre získanie nosnej frekvencie, časovanie rámečka, CP dĺžky, duplex módy a Physical Cell Identity (PCID). [2]

LTE Cat-M podporuje 504 PCID, ktoré sú rozdelené do 168 skupín. Každá zo skupín následne obsahuje 3 identity. Pri využití PCID je možné jeho znovu využitie pokiaľ je splnená podmienka, že bunku, ktoré využívajú rovnaké PCID sú od seba dostatočne vzdialené. [2]

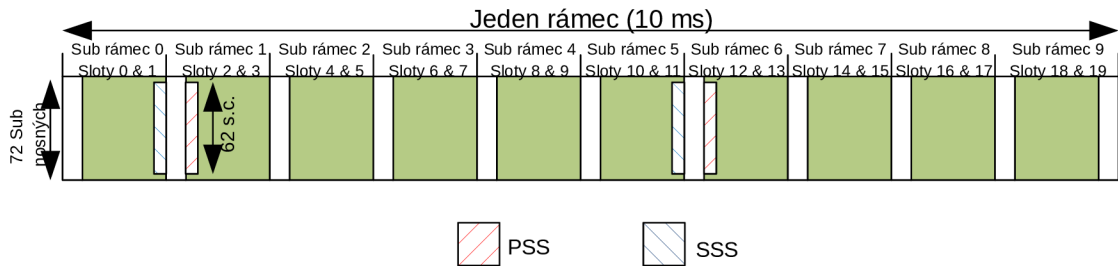
Z Obr. 2.14 vyplýva, že PSS je mapované do posledného OFDM symbolu v slotе #0 a #10. SSS symbol je umiestnený tesne pred PSS symbolom.

Z Obr. 2.15 vyplýva, že PSS je mapované do tretieho OFDM symbolu v slotе



Obr. 2.14: Synchronizačné signály v FDD. [2]

#1 a #6. SSS symbol je umiestnený 3 symboly pred PSS symbolom. Poloha PSS a SSS signálu môže byť mierne pozmenená v závislosti na hodnote CP. Vďaka detekcie PSS a SSS signálov je zariadenie samo schopné detekovať či ide o normálne CP alebo rozšírené CP. [2]

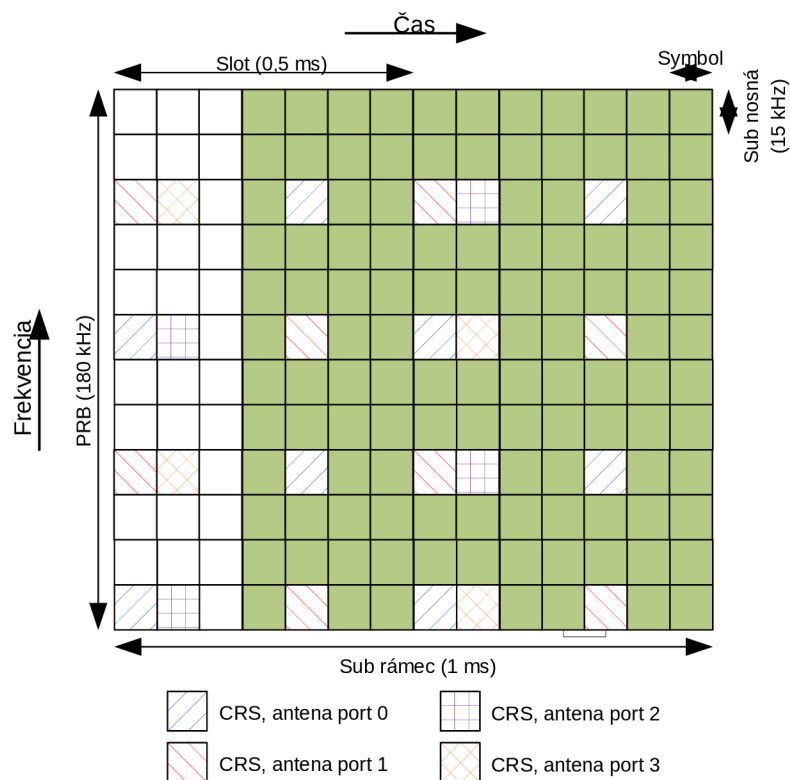


Obr. 2.15: Synchronizačné signály v TDD. [2]

2.7.3 Referenčný signál v DL

Downlink referenčné signály sú preddefinované signály vysielané základovou stanicou, ktoré slúžia aby bolo možné demodulovať fyzické kanály DL. CRS hodnota sa využíva pre demodulovanie PBCH alebo PDSCH kanálu a je vysielaná z 1., 2. alebo 4. logického portu antény.

Na Obr. 2.16 je zobrazené, že CRS pre rôzne anténne porty je mapované v RE, PRB a každom sub rámečeku bunky. V závislosti od PCID hodnoty je možné, že CRS môže byť frekvenčne posunuté o jednu alebo dve sub nosné. [2]



Obr. 2.16: Cell-specific referenčný signál v LTE Cat-M. [2]

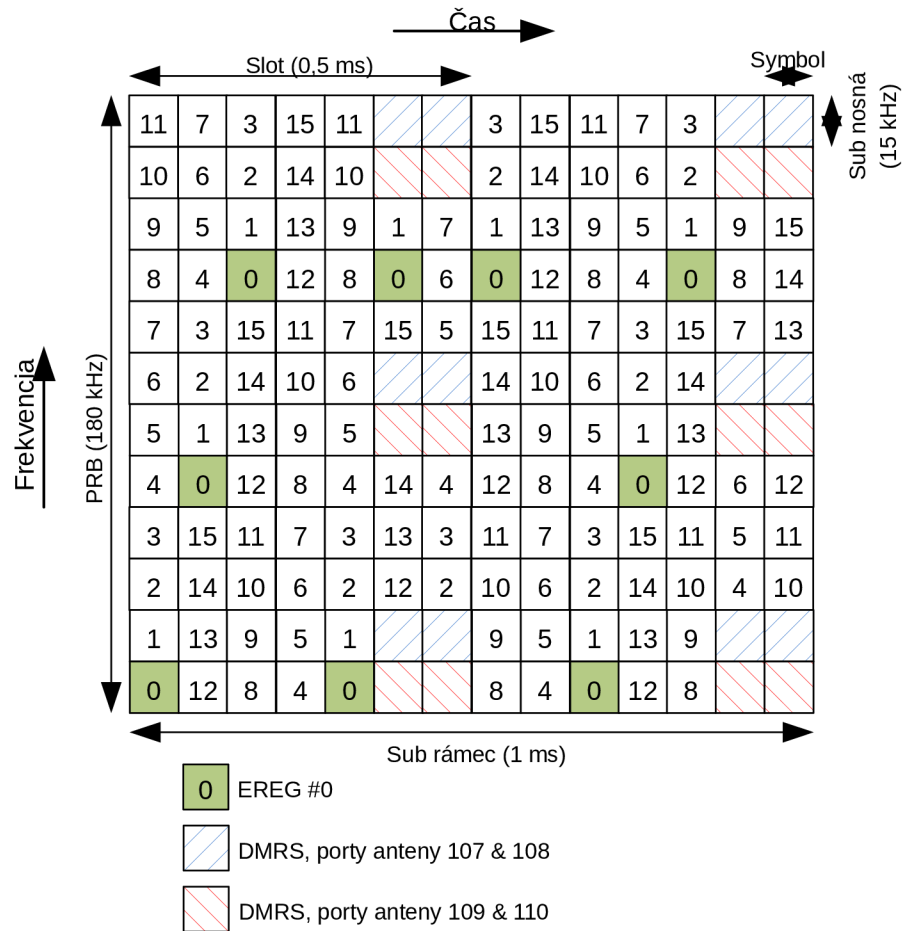
2.7.4 MPDCCH kanál

MPDCCH kanál sa využíva pre prenos Downlink Control Information (DCI). Zariadenia monitorujú MPDCCH kanál k získaniu nasledujúcich informácií: [2]

- UL power control command (DCI Format 3/3A),
- UL grant information (DCI Format 6-0A/6-0B in CE mode A/B),
- DL scheduling information (DCI Format 6-1A/6-1B in CE mode A/B).

V MPDCCH kanály je každý RE v jednom PRB páre rozdelený do 16 Enhanced Resource-Element Groups (EREGs), kedy každý EREG obsahuje 9 RE. Toto rozdelenie je vyobrazené na Obr. 2.17. Normálny sub rámeček s normálnou hodnotou CP ($4,7 \mu s$) obsahuje 4 EREG a 36 RE. EREG je možné ďalej kombinovať do enhanced control channel elements (ECCEs). [2]

Pre dosiahnutie dostatočného pokrytia sa využije agregácia ECCE v MPDCCH kanály podľa ECCE agragačnej úrovne MPDCCH kanálu. Pre bežný sub rámeček s normálnou hodnotou CP ($4,7 \mu s$) agregácia nadobúda 2, 4, 8, 16 alebo 24 ECCE (najväčšia hodnota agregácie zodpovedá agregácií všetkých RE v 6 PRBs). [2]



Obr. 2.17: Enhanced resource-element groups (EREGs) pre MPDCCH. [2]

Dosiahnutie, čo najlepšieho CE je možné v spojení s maximálnou hodnotou ECCE agregácie dosiahnuť počet opakovaní sub rámca až 256 krát. [2]

2.7.5 PDSCH kanál

PDSCH kanál je primárne určený pre prenos unicast dát. Dáta sú z vyšších vrstiev rozdelené do jedného alebo viacerých transport blocks (TB). PDSCH je schopný prenosu jedného TB za určitý čas.

V nasledujúcej Tab. 2.5 je zobrazené Modulation and Coding Schemes (MCS) a Transport Block Size (TBS), maximálna veľkosť je obmedzená na hodnotu 1000 bitov pre PDSCH kanál a pre oba CE módy (mód A a mód B). [2]

MCS	Modulačná	TBS	CE mód A (#PRBs)						CE mód B (#PRBs)	
Index	schéma	Index	1	2	3	4	5	6	4	6
0	QPSK	0	16	32	56	88	120	152	88	152
1	QPSK	1	24	56	88	144	176	208	144	208
2	QPSK	2	32	72	144	176	208	256	176	256
3	QPSK	3	40	104	176	208	256	328	208	328
4	QPSK	4	56	120	208	256	328	408	256	408
5	QPSK	5	72	144	224	328	424	504	328	504
6	QPSK	6	328	176	256	392	504	600	392	600
7	QPSK	7	104	224	328	472	584	712	472	712
8	QPSK	8	120	256	392	536	680	808	536	808
9	QPSK	9	136	296	456	616	776	936	616	936
10	16QAM	9	144	328	504	680	872	1032	X	X
11	16QAM	10	144	328	504	680	872	1032	X	X
12	16QAM	11	176	376	584	776	1000	1192	X	X
13	16QAM	12	208	440	680	904	1128	1352	X	X
14	16QAM	13	224	488	744	1000	1256	1544	X	X
15	16QAM	14	256	552	840	1128	1416	1736	X	X

Tab. 2.5: PDSCH modulácia a kódovanie a TBS index v LTE Cat-M. [2]

Odlišnosti v závislosti od zvoleného CE módu: [2]

- CE mód A, kedy PDSCH kanál využíva QPSK alebo 16QAM moduláciu a mapuje sa medzi 1 a 6 PRBs.
- CE mód B, kedy PDSCH kanál využíva QPSK moduláciu a mapuje sa do 4. alebo 6. PRBs.

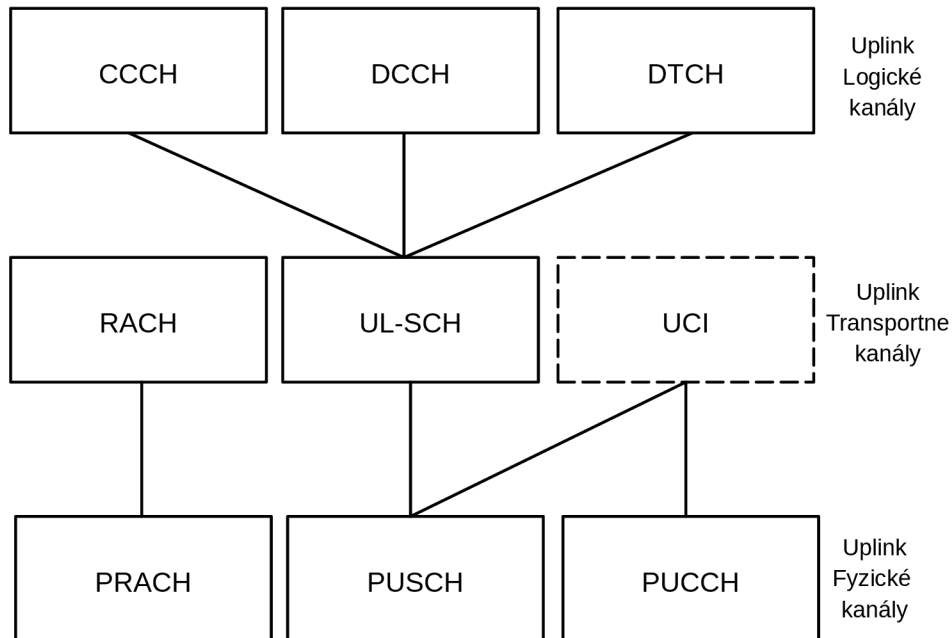
LTE Cat-M technológia podporuje PDSCH transmission modes (TM) (od LTE technológie): [2]

- TM1: Single-antenna transmission (podporuje CE mód A a B),
- TM2: Transmit diversity (podporuje CE mód A a B),
- TM6: Closed-loop codebook-based precoding (podporuje len CE mód A),
- TM9: Non-codebook-based precoding (podporuje CE mód A a B).

2.8 Spôsob prenosu dáv v Uplink-u

LTE Cat-M disponuje paletou UL kanálov a signálov, ktoré sú znázornené na Obr. 2.18. Fyzická vrstva poskytuje mechanizmy pre prenos dát k vyšším vrstvám pomocou transportných kanálov prostredníctvom Medium Access Control (MAC) vrstvy. Uplink Control Information (UCI) zobrazený na Obr. 2.18 nepatrí k transportným kanálom. [2]

Nasledujúca časť sa bude bližšie zaoberať komunikačným smerom uplink a kanálmi, ktoré sa využívajú pri odosielaní v UL, tj. Physical Random Access Channel (PRACH) a Physical Uplink Control Channel (PUCCH). Uplink Reference Signals (RS) nie sú zobrazené v Obr. 2.18 ale odosielajú sa spolu s PUSCH alebo PUCCH, poprípade môžu byť odoslané samostatne na požiadanie. [2]



Obr. 2.18: Uplink kanály v LTE Cat-M. [2]

2.8.1 Uplink sub rámec

V SI rámci je možné vyslať bit-mapový sub-rámec, ktorý v UL označuje platné rámce pre prenos v LTE Cat-M. Pre FDD UL je prenosová bit-mapa o veľkosti 10 bitov, čo odpovedá jednému UL sub rámcu v rámci. Pre TDD UL je prenosová bit-mapa o veľkosti v rozmedzí od 10 do 40 bitov, čo odpovedá sub rámcu v rámci 1 až 4 rámcov. [2]

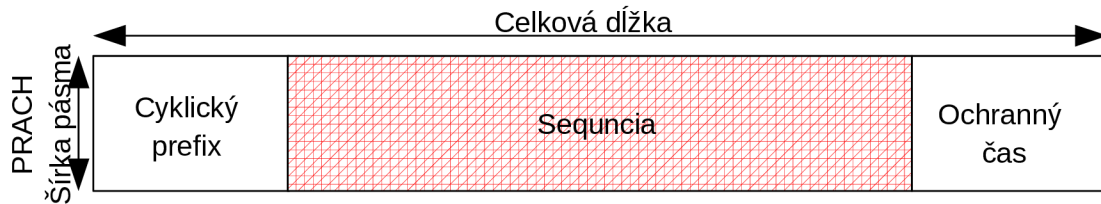
Z pravidla sú všetky sub rámce v UL prenose označené ako validné pre prenos. LTE Cat-M podobne ako tomu bolo pri DL sub rámci, tak pri zmene z jedného úzko-pásmového spektra (UL) na prvom sub rámci do iného úzko-pásmového spektra (UL) na druhom sub rámci využíva guardperiod for narrowband retuning. V tomto stave zariadenie nevysiela prvé dva SC-FDMA symboly. [2]

V prípade, keď oba sub rámce nesú PUSCH alebo PUCCH potom je guardperióda vytvorená skrátením posledného symbolu v prvom sub rámci a skrátením prvého symbolu v druhom sub rámci. V prípade, kedy jeden sub rámec nesie PUSCH

ale druhý nesie PUCCH potom sa neskracujú symboly v PUSCH. Dôvod prečo nenastáva skrátenie symbolu je, že PUSCH je dobre chránený robustným kódovaním a opakovaným prenosom (na rozdiel od PUCCH). [2]

2.8.2 PRACH

PRACH kanál je využívaný zariadením pre inicializáciu spojenia. Vďaka PRACH je možné získať oneskorenie šírenia signálu medzi zariadením a základovou stanicou. [2]



Obr. 2.19: Štruktúra PRACH preambuly v LTE Cat-M. [2]

V Tab. 2.6 sú zobrazené LTE PRACH formáty, ktoré sú využívané opakovane. Symbol T_S je základná časová jednotka LTE ($1/(15\,000 \cdot 2048)$). PRACH kanál je možné nakonfigurovať rôznymi spôsobmi ktorými sa mapuje na štruktúru sub rámca. [2]

PRACH formát	CP dĺžka (T_S)	Sekvenčná dĺžka (T_S)	Celková dĺžka (ms)	Rozsah z guard času (km)	FDD PRACH konfigurácia	TDD PRACH konfigurácia
0	3,168	24,576	1	15	0-15	0-19
1	21,024	24,576	2	78	16-31	20-29
2	6,240	2 * 24,576	2	30	32-47	30-39
3	21,024	2 * 24,576	3	108	48-63	40-47

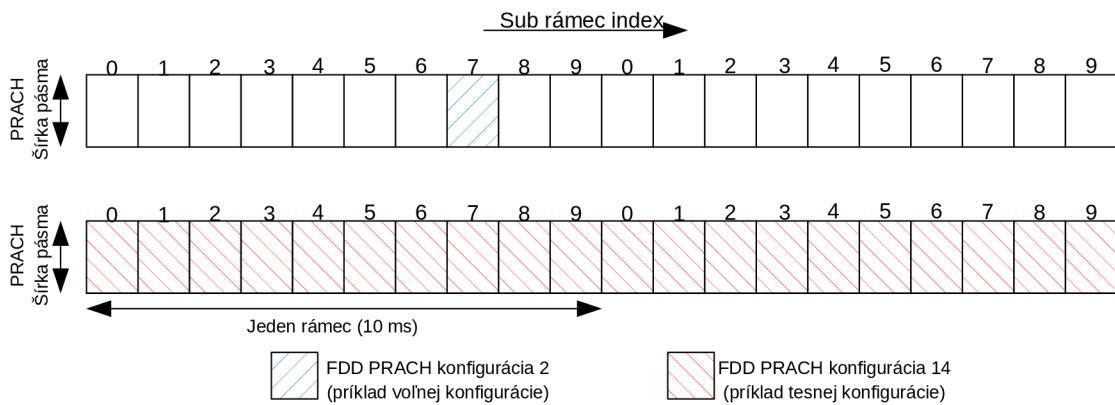
Tab. 2.6: Formáty PRACH kanálu v LTE Cat-M. [2]

Na Obr. 2.20 je znázornená možnosť konfigurácie PRACH kanála. Na obrázku je znázornená možná konfigurácia, ktorá môže byť časovo hustá alebo riedka. [2] FDD PRACH konfigurácia 2 (vrchný obrázok) využíva každý dvadsiaty sub rámec.

FDD PRACH konfigurácia 14 (spodný obrázok) využíva každý jeden sub rámec. PRACH disponuje až 64 druhov konfigurácie, podľa ktorých je možné kanál nakonfigurovať aby spĺňal požiadavky aplikácie. [2]

V spojení s CE modmi je možné definovať rôzne PRACH CE úrovne. Pre CE mód B je možné definovať až 4 úrovne PRACH CE. Pre CE mód A je možné definovať maximálne 2 úrovne PRACH CE. [2]

Pre rozlíšenie úrovní PRACH CE má sieť k dispozícii niekoľko mechanizmov: [2]

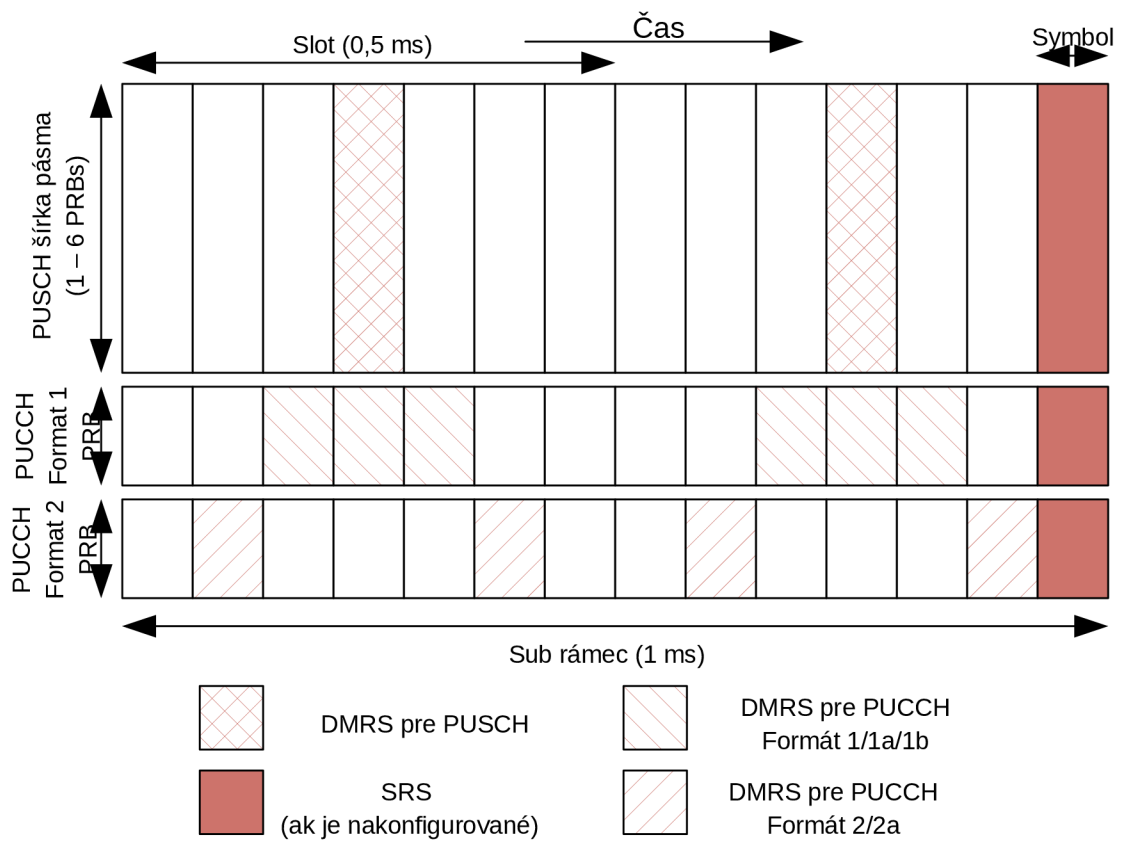


Obr. 2.20: Príklad konfigurácie PRACH kanála v LTE Cat-M. [2]

- Frequency domain - využívajú sa rôzne PRACH frekvencie pre rôzne úrovne PRACH CE,
- Time domain - využíva rôzne PRACH konfigurácie a PRACH počiatkové periodicity sub rámca pre rôzne úrovne PRACH CE,
- Sequence domain - využíva rôzne neprekrývajúce sa PRACH sequencie preambul pre rôzne úrovne PRACH CE.

2.8.3 Uplink Referenčné signály

Uplink referenčné signály sú signály vysielané zariadením, pomocou ktorých je možné demodulovať fyzické kanály UL. Demodulation Reference Signal (DMRS) sa pre PUSCH a PUCCH vysiela v SC-FDMA symboloch ako je zobrazené v Tab. 2.7 pre každý slot v prenášanom UL sub rámci. Šírka pásma DMRS je rovná šírke pásma kanálu, teda od 1 do 6 PRB pre PUSCH a 1 PRB pre PUCCH. [2]



Obr. 2.21: Uplink referenčné signály v LTE Cat-M. [2]

Pre prípad, kedy je požadovaný prenos Sounding Reference Signal (SRS) pre prenos zvuku rádiového kanálu je možné rezervovať posledný SC-FDMA symbol z UL sub rámca. Zariadenie je následne však nútené pracovať s kratším formátom pre PUSCH a PUCCH. Opakované vysielanie SRS je možné nakonfigurovať pomocou RRC konfigurácie. [2]

RS taktiež môžu využívať CE módy. CE mód A podporuje periodický aj neperiodický SRS prenos. CE mód B prenos SRS nepodporuje vôbec ale umožňuje využitie kratších formátov (pre PUSCH a PUCCH), čím je zabezpečený bez kolízny prenos a iné zariadenia tak môžu bez kolízií prenášať SRS. [2]

Fyzický kanál	DMRS pozícia v slotě (SC-FDMA symbol začína 0)	
	Hodnota normálneho CP (7 symbolov na Slot)	Hodnota rozšíreného CP (6 symbolov na Slot)
PUSCH	3	2
PUCCH Formát 1/1a/1b	2, 3, 4	2, 3
PUCCH Formát 2	1, 5	3
PUCCH Formát 2a	1, 5	X

Tab. 2.7: Umiestnenie DMRS v LTE Cat-M. [2]

2.8.4 PUSCH

PUSCH kanál je primárne určený pre prenos unicast dát. Dáta sú z vyšších vrstiev rozdelené do jedného alebo viacerých transport blocks (TB). PUSCH je schopný prenosu jedného TB za určitý čas. V nasledujúcej Tab. 2.8 je zobrazené modulation and coding schemes (MCS) a transport block size (TBS), maximálna veľkosť je obmedzená na hodnotu 1000 bitov pre PUSCH kanál a pre oba CE módy (mód A a mód B). [2]

Pri využití HD-FDD a CE módu B môže nastať situácia, kedy pri dlhom PUSCH prenose zariadenie vyžaduje vkladanie medzery medzi vysielaním. V takomto prípade zariadenie vkladá každých 256 ms jednu 40 ms medzeru. Pri využití rôzneho CE módu nastávajú určité odlišnosti. CE mód A, kedy PUSCH kanál využíva QPSK alebo 16QAM moduláciu a mapuje sa medzi 1 a 6 PRB. CE mód B je mód, kedy PUSCH kanál využíva QPSK moduláciu a mapuje sa do 1. alebo 2. PRB. [2]

MCS	Modulačná	TBS	CE mód A (#PRBs)						CE mód B (#PRBs)	
Index	schéma	Index	1	2	3	4	5	6	4	6
0	QPSK	0	16	32	56	88	120	152	88	152
1	QPSK	1	24	56	88	144	176	208	144	208
2	QPSK	2	32	72	144	176	208	256	176	256
3	QPSK	3	40	104	176	208	256	328	208	328
4	QPSK	4	56	120	208	256	328	408	256	408
5	QPSK	5	72	144	224	328	424	504	328	504
6	QPSK	6	328	176	256	392	504	600	392	600
7	QPSK	7	104	224	328	472	584	712	472	712
8	QPSK	8	120	256	392	536	680	808	536	808
9	QPSK	9	136	296	456	616	776	936	616	936
10	16QAM	9	144	328	504	680	872	1032	X	X
11	16QAM	10	144	328	504	680	872	1032	X	X
12	16QAM	11	176	376	584	776	1000	1192	X	X
13	16QAM	12	208	440	680	904	1128	1352	X	X
14	16QAM	13	224	488	744	1000	1256	1544	X	X
15	16QAM	14	256	552	840	1128	1416	1736	X	X

Tab. 2.8: PUSCH modulácia, kódovanie a TBS index v LTE Cat-M. [2]

2.8.5 PUCCH

PUCCH kanál sa využíva pre prenos Uplink Control Information (UCI), konkrétne potom nasledujúcich typov: [2]

- UL scheduling request (SR),
- DL HARQ feedback (ACK or NACK),
- DL CSI.

PUCCH kanál sa mapuje do konfigurovateľnej PUCCH oblasti, ktorá pozostáva z 2 PRB. Rozstup je rovnaký od stredovej frekvencie šírky pásma LTE technológie. PUCCH sa bližšie mapuje do SC-FDMA symbolov, ktoré nie sú využívané DMRS (viacej v sekcii 2.8.3).

Pre PUCCH kanál je počet opakovaní sub rámca v pripojenom móde závislá od CE módu. Pri Ce móde A môže počet opakovaní nadobúdať hodnoty 1, 2, 4 a 8 opakovaní. Pre rôzne PUCCH formáty je možné následne ešte nakonfigurovať iné počty opakovaní. Pre CE mód B je možné dosiahnuť väčšieho počtu opakovaní, konkrétne až 4, 8, 16, 32 pri 3GPP Release 13 a 4, 8, 16, 32, 64, 128 pri 3GPP Release 14. [2]

PUCCH formát	Popis	Modulačná schéma	Komentár
1	Potreba žiadosti na plánovanie	On-off Keying (OOK)	Podporované v CE móde A a B
1a	1-bit HARQ feedback	BPSK	Podporované v CE móde A a B
1b	2-bity HARQ feedback pre TDD	QPSK	Podporované len v CE móde A
2	20-bit CSI	QPSK	Podporované len v CE móde A
2a	20-bit CSI + 1-bit HARQ feedback	QPSK + BPSK	Podporované len v CE móde A
2b	20-bit CSI + 2-bit HARQ feedback pre TDD	QPSK + QPSK	Podporované len v CE móde A

Tab. 2.9: PUCCH formáty v LTE Cat-M. [2]

Zariadenie v pripojenom stave s platným PUCCH zdrojom pre SR, môže ho využiť pre prístup k UL prenosu. V opačnom prípade sa musí zariadenie spoliehať na náhodný prístup ("random access procedure").

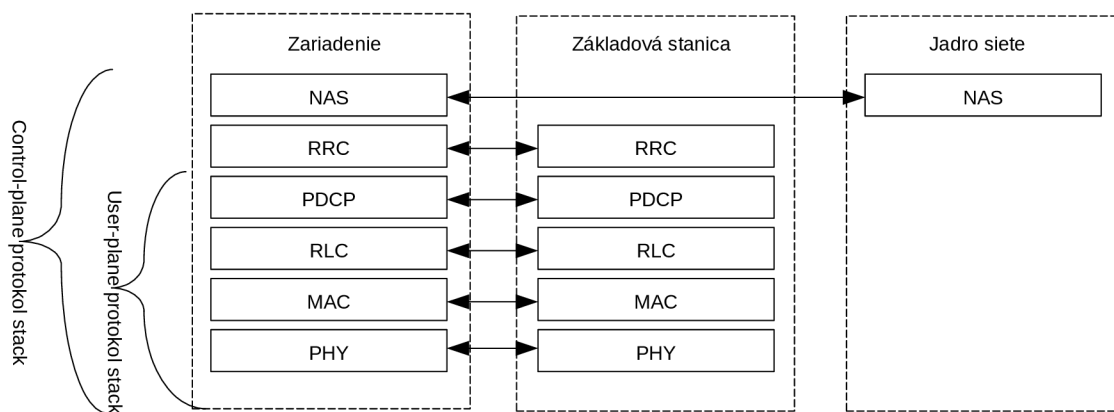
Pri PUCCH a taktiež pri PUSCH kanály nie je podporovaný prenos viacej ako jedného PUCCH (PUSCH) z jedného zariadenia súčasne. V situácií kedy zariadenie vysiela PUSCH a UCI súčasne v sub rámci musí byť zaistené, že PUSCH a PUCCH nemajú nastavené opakovanie. UCI je potom multiplexované do PUSCH (normálny stav v LTE technológií). V prípade kedy však PUSCH alebo PUCCH majú nastavené opakovanie potom PUSCH je priradené do takéhoto rámca. [2]

2.9 Operačné módy technológie

V nasledujúcich dvoch sekci 2.10 a 2.11 bude popísaná LTE Cat-M fyzická vrstva v kontexte s vyššími protokolmi vrstiev a aktivitami týchto modov. Popísané aktivity sa vzťahujú od inicializácie, nastavenia až po kontrolovanie pripojenia.

IDLE mód zahŕňa procedúry typu: výber počiatočnej bunky, získanie SI, opätovný výber bunky a stránkovacie procesy. Zmena z IDLE módu do Connected módu zahŕňa procedúry náhodného prístupu Random Access (RA) a kontrolu prístupu ("access control").

Connected mód zahŕňa procedúry typu: plánovanie prenosu, opätovný prenos, kontrola napájania a mobility. [2] Základný popis fyzických, transportných a logických kanálov bol načrtnutý v Obr. 2.11 a Obr. 2.18.



Obr. 2.22: Protokolový balík pre LTE Cat-M. [2]

2.10 IDLE mód zariadenia

Prvou úlohou, ktorú musí IDLE mód zabezpečiť je výber bunky. Po vybraní bunky prebieha väčšina komunikácie medzi zariadením a základovou stanicou pomocou 16-bitového Radio Network Temporary Identifier (RNTI), kedy zariadenie aj v IDLE móde kontroluje RNTI pre prípad volania [2].

Výber bunky je prvým krokom, ktorý zariadenie vykonáva. Hlavným cieľom výberu bunky je: identifikovanie, synchronizovanie a určenie vhodnej bunky. Postup pre výber bunky v LTE Cat-M je: [2]

1. Vyhľadávanie PSS pre identifikáciu dostupnej LTE bunky. Následne prebehne synchronizácia v čase a frekvencií podľa LTE nosnej frekvencie.
2. Synchronizácia s SSS pre identifikáciu časovania rámca, PCID, CP dĺžky a duplex módu (FDD alebo TDD).
3. Zistenie Master Information Block (MIB) pre identifikáciu SFN, DL šírky pásma a informácií o plánovaní pre LTE System Information Block 1 (SIB1).
4. Zistením SIB1 pre identifikáciu UL-DL konfigurácie (v prípade využitia TDD) a ďalších základných informácií.

Po získaní a stanovení vhodnej bunky nasleduje postup pre získanie celej sady informácií o systéme, získanie SI. V nasledujúcej Tab. 2.10 sú bližšie popísané typy SIB. SIB su pre LTE Cat-M zdedené z LTE technológie. SIB, ktoré nie sú v LTE Cat-M podporované sa v Tab. 2.10 nenachádzajú. Patrí sem SIB13, SIB15, SIB18 a SIB19. [2]

Medzi najdôležitejšie SIB patrí SIB1 a SIB2, ktoré obsahujú najdôležitejšie informácie SI. Tieto informácie sú vyžadované zariadením aby bolo možné správne zvolenie bunky. [2]

SIB	Obsah
SIB1	Dôležité informácie, či má zariadenie umožnený prístup do bunky, plánovanie a zber ďalších SIB
SIB2	Informácie pre konfiguráciu spoločných a zdieľaných kanálov
SIB3	Informácie pri opätovnom výbere bunky, bližšie potom o obslužnej bunke
SIB4	Informácie o obslužnej frekvencii a informácie o intra-frekvencii susedných buniek relevantných pri opätovnom výbere bunky
SIB5	Informácie o ostatných frekvenciách a informáciách o intra frekvenciách susedných buniek relevantných pri opätovnom výbere bunky
SIB6	Informácie o UMTS 3G frekvenciách a susedných bunkách relevantných pri opätovnom výbere bunky
SIB7	Informácie o GSM frekvenciách bunky a opätovnom výbere bunky
SIB8	Informácie o CDMA2000 3G frekvenciách a susedných bunkách relevantných pri opätovnom výbere bunky
SIB9	Názov základovej stanice, v prípade kedy ide o malú napríklad domácu stanicu
SIB10	upozornenie o zemetrasení a tsunami, Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS)
SIB11	ETWS sekundárna notifikácia
SIB12	Komerčný mobilný varovný systém varovania
SIB14	Informácia o rozšírenom blokovanom systéme pre riadenie prístupu
SIB16	Informácie dôležité pre GPS a koordinovaný svetový čas
SIB17	Informácie o riadení prístupu medzi E-UTRAN a WLAN
SIB20	Informácie o jedno-bunkovom multicaste typu point-to-multipoint (od Release 14)

Tab. 2.10: SIB typy v LTE Cat-M. [2]

SIB1 môže obsahovať 5-bitový SI tag, ktorý indikuje akúkoľvek zmenu uskutočnenú v SI obsahu. Ostatné SIB môžu byť ale taktiež nemusia byť poskytované sieťou. O poskytovaní týchto informácií rozhoduje konfigurácia danej siete.

Pri LTE Cat-M je potrebné mať na mysli, že SI sa prenáša oddelene od SI pre bežnú LTE technológiu. Hlavný dôvod takéhoto oddeleného prenosu, že SI v LTE sú plánované PDCCH a tým môže prenos zaberat až príliš veľkú šírku pásma, ktoré LTE Cat-M zariadenie nie je schopné spracovať. SIB sa prenášajú v SI správe, kedy správa môže obsahovať aj viacej SIB. SIB1 sa však v SI správe neprenáša, prenáša sa v PDSCH (s využitím QPSK modulácie). [2]

Po výbere bunky zariadenie stále monitoruje susedné bunky. Toto monitorovanie je z dôvodu, že pri výskyte susednej bunky, ktorá poskytuje lepšie vlastnosti (napríklad silnejší signál) môže nastať zmena bunky za lepšiu bunku s lepšími vlastnosťami. Mechanizmus re-selekcie bunky je hlavným mechanizmom pre mobility IDLE mód. [2]

2.10.1 Random access

Random access v IDLE móde pre LTE Cat-M vychádza z postupu z LTE technológie. Po synchronizácii do siete sa načítajú PRACH konfiguračné informácie zo SIB2 následne je zariadenie schopné poslať PRACH preambulu k prístupu do siete. Po vyslaní PRACH preambuly a jej detekovaní základovou stanicou vysielala stanica späť Random Access Response (RAR), správa 2. RAR obsahuje informácie potrebné pre zariadenie aby mohlo následne toto zariadenie vyslať požiadavku na pripojenie, ktorá obsahuje údaje konkrétneho zariadenia v RRC správe, správa 3. V 4. správe prenáša stanica správu o nastavení (obnovení) spojenia a riešenia prípadných sporov, ktoré mohli počas komunikácie nastať. Zariadenia nakoniec posielajú nastavenie spojenia aby sa uskutočnil proces náhodného prístupu a zariadenie sa preplo do pripojeného stavu. [2]

2.10.2 Access Control

Access control v LTE Cat-M podporuje Access Class Barring (ACB) a Extended Access Barring (EAB). EAB je prenášaná v SIB14, ktorého plánovaciu informáciu prenáša SIB1. V prípade, kedy nie je SIB14 plánovacia informácia prítomná v SIB1 prenose informuje zariadenie, že blokovanie nie je aktívne. V prípade, kedy je SIB14 plánovacia informácia prítomná v SIB1 prenose informuje zariadenie, že blokovanie je aktívne. [2]

2.11 Connected mód zariadenia

Najväčší podiel pri komunikácii zariadenia so základovou stanicou závisí od 16-bitového RNTI zasielaného základovou stanicou. RNTI sú následne kontrolované zariadeniami v connected móde. [2]

2.11.1 Plánovanie

V nasledujúcej časti bude popísaný priebeh plánovania pre prenos v UL a DL. Pri potrebe dynamického plánovania vysiela základová stanica zariadeniu DCI, ktoré obsahuje potrebné informácie o alokovanom zdroji. Medzi tieto informácie patrí pridelená časová a frekvenčná doména, modulácia, kódovacia schéma a HARQ schéma. DCI sa prenáša v MPDCCH kanály.

DCI nesie CRC, ktoré je maskované špecifickým Cell RNTI (C-RNTI) pre každé zariadenie. Využitím C-RNTI je zabezpečené, že úspešné dekódovanie CRC je možné len zariadením, pre ktoré je vysielané CRC určené. [2]

Dynamické DL plánovanie

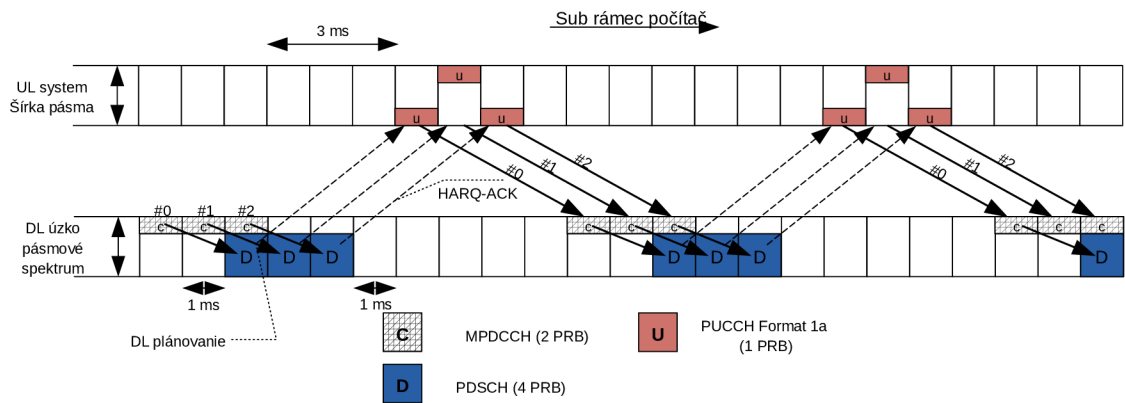
Pre uľahčenie náročnosti zariadenia LTE Cat-M využívajú implementáciu nasledujúcich plánovacích princípov. [2]

- Cross-subframe scheduling - s požiadavkami na úsporné využitie čas sa DCI a plánovaný prenos dát prenášajú oddelene, každý v samostatnom sub rámci.
- Pri využití HD-FDD operácie (neprebíha súčasný príjem a vysielenie dát) je poskytnutý čas na prepnutie zariadenia z stavu prijímania do stavu vysielenia.

Na Obr. 2.23 je zobrazené DL plánovanie bez opakovania s využitím MPDCCH a PDSCH kanálov na prenos v úzko-pásmovom spektre.

Pri LTE je PDCCH alebo EPDCCH prenášajú DCI a v PDSCH sa vysiela dáta prenášajú v rovnakom sub rámci. Pri LTE Cat-M s využitím Cross-subframe plánovania sa sa vkladá 2 ms oneskorenie medzi MPDCCH, ktorý nesie DCI a plánovanom PDSCH. Pri prenose, kedy sa DCI neprenáša sa uplatňujú rovnaké postupy ako pri LTE. Medzi PDSCH a PUCCH nesúceho HARQ-ACK feedback je vložené 4 ms oneskorenie následne potom ďalšie 4 ms oneskorenie pred možným HARQ opakovanom prenose. Kvôli dodatočnému 2 ms oneskoreniu sa DL HARQ, Round-Trip Time (RTT) predlžuje zo $4 + 4 = 8$ ms na $4 + 4 + 2 = 10$ ms. [2]

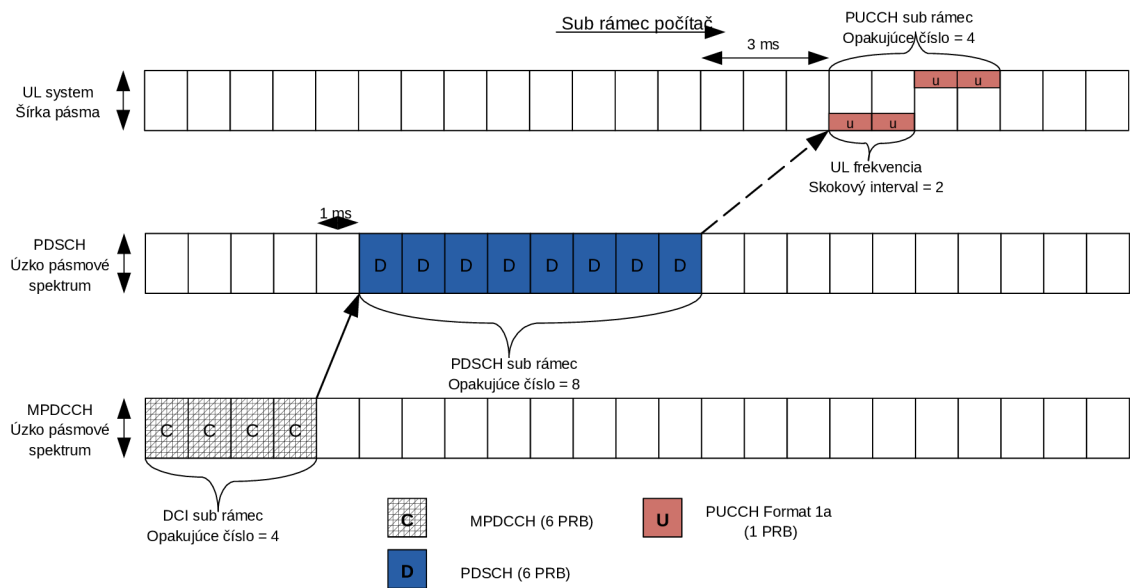
Základová stanica plánuje DL prenos na PDSCH dynamicky s využitím DCI formátu 6-1A a 6-1B v oboch CE modoch. Pri CE mód B je DCI formát, čo najmenší, pretože môže nastať situácia s nízkym DL signálom a nutnosťou veľkého počtu opakovaní pre dosiahnutie veľkého pokrytia. [2]



Obr. 2.23: Downlink plánovanie pri prenose s využitím MPDCCH a PDSCH bez opakovania v LTE Cat-M. [2]

Na Obr. 2.24 je zobrazené DL plánovanie s opakovaním a využitím MPDCCH a PDSCH kanálov na získanie rozšíreného pokrytia. MPDCCH nesúce DCI je opakované v 4 sub rámcoch, PDSCH nesúce dáta je opakované v 8 sub rámcoch a PUCCH nesúce HARQ-ACK feedback je opakované v 4 sub rámcoch. [2]

MPDCCH a PDSCH sú prenášané s využitím maximálnej šírky kanálu podporujúcich v jednotlivých CE modoch. V Release 13 je definovaná hodnota pre 1 úzko-pásmové spektrum určená pre 6 PRBs. Z Obr. 2.24 vychádza, že preskakovanie frekvencií (frequency hopping) v UL je definované 2 ms oneskorením. [2]



Obr. 2.24: Downlink plánovanie pri prenose s využitím MPDCCH a PDSCH s opakovaním v LTE Cat-M. [2]

Dynamické UL plánovanie

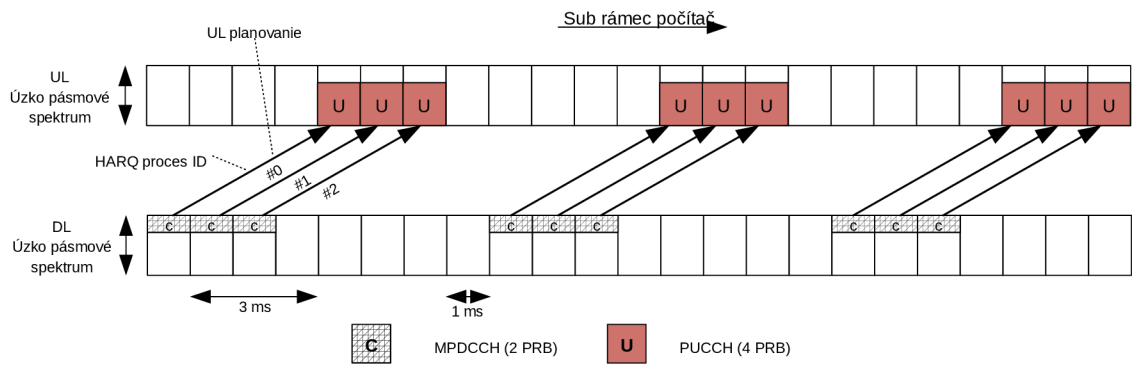
Na Obr. 2.25 je zobrazené UL plánovanie bez opakovania. Podobne ako v LTE je DCI prenášané v MPDCCH s plánovaným PUSCH prenosom so 4 ms oneskorením.

V porovnaní s LTE je v LTE Cat-M technológií UL HARQ schéma asynchrónna. V LTE Cat-M je HARQ opakovaný prenos explicitne naplánovaný s využitím DCI na MPDCCH. Okrem tejto zmeny sú potom ostatné HARQ mechanizmy v LTE Cat-M zhodné s LTE technológiou. Maximálny počet UL HARQ je závislá od CE móde. [2]

Základová stanica plánuje UL prenos na PUSCH dynamicky s využitím DCI formátu 6-0A a 6-0B v oboch CE modoch. Základné fungovanie je podobné ako tomu bolo pri DL (PDSCH). Rozdiel nastáva pri CE mód B, kedy je PUSCH prenos vždy plánovaný maximálne na pár PRB (1 alebo 2 PRB) a PDSCH prenos plánovaný na 4 alebo 6 PRB. [2]

Na rozdiel od DL sa v UL pri zvýšení šírky pásma v kanále nemusí umožniť aj navýšenie vysielacieho výkonu. Nastane tak situácia, že bez navýšenia vysielacieho výkonu sa len plytvá šírkou pásma pri jej zvýšenom alokovaní. [2]

V prípade, keď je zariadenie v pripojenom režime a má dáta na vysielanie ale nemá PUSCH môže požiadať o pridelenie PUSCH zdroja vysielaním SR na PUCCH. [2]



Obr. 2.25: Uplink plánovanie pri prenose s využitím MPDCCH a PDSCH s opakovaním v LTE Cat-M. [2]

Semipersistent scheduling (SPS) je v LTE Cat-M technológiách v kombinácii s CE modom A podporované. Základné fungovanie SPS vychádza z fungovania SPS v LTE technológiách. V LTE sa SPS využíva napríklad pri službe Voice over Internet Protocol (VoIP). [2]

Po nakonfigurovaní SPS je LTE Cat-M zariadenie konfigurované vyššími vrstvami s SPS-C-RNTI a časovým intervalom. Pomocou DCI je možné SPS na zariadení aktivovať poprípade deaktivovať pomocou SPS-C-RNTI. Následne je SPS-C-RNTI možné využiť pre plánovanie HARQ opakovaných prenosov. Kedykoľvek však SPS-C-RNTI môže byť v prípade potreby prepísané dynamickým plánovaním. [2]

2.11.2 Náhodný prístup v pripojenom stave

Náhodný prístup poprípade tiež Random Access môže byť zariadením aktivované v pripojenom stave, keď je vyžadované UL TA príkazom (UL grant-om).

Následný náhodný prístup sa uskutoční s podobným RAR a správou 3 ako tomu bolo v náhodnom prístupe v IDLE stave (popísané v sekcii 2.10). Avšak rozdiel je, že od IDLE stavu v pripojenom stave správa 3 neobsahuje RRC správu a zariadenie už má priradené C-RNTI. V naslednom 4. kroku je potom v pripojenom stave uplatnenie C-RNTI pred Temporary Cell-RNTI (TC-RNTI) ako tomu bolo v IDLE móde.

Pre prípad, kedy základová stanica vyžaduje od zariadenia inicializáciu náhodného prístupu môže ho k tomu vyzvať pomocou vysielania PDCCH príkazu. Využitie tohto procesu sa nachádza napríklad pri prechode zariadenia do inej bunky, obnove po stave, keď zariadenie dlhší čas nevykonalo DL prenos dát. Pre inicializáciu požiadavky pomocou PDCCH príkazu sa využije modifikovaná verzia DCI Formátu 6-1A a 6-1B.

Podobne ako v LTE je možné nastaviť PRACH preambul index pre umožnenie takzvaného "contention-free random access". V tomto prípade nie je potrebné explicitný výsledok pripojenia a mechanizmus náhodného prístupu končí s prijatím RAR. [2]

2.11.3 Správa napájania

Pre riadenie napájania sa využíva Transmit Power Control (TPC). TPC príkaz pre PUSCH alebo PUCCH je možné poslať zariadeniu v CE móde A s využitím TPC príznaku v DCI Formate 6-0A a 6-1B alebo v DCI Formáte 3/3A adresované pomocou TPC-PUSCH-RNTI alebo TPC-PUCCH-RNTI. Samotné DCI s formátom 3/3A môže niesť príkaz o riadení napájanie aj niekoľkým zariadeniam naraz.

Pre zariadenie pracujúce v CE móde B sa očakáva, že z dôvodu zlého pokrytia sa vždy pri vysielaní využíva maximálny vysielací výkon. [2]

2.11.4 Správa mobility

Podobne ako tomu bolo pri IDLE stavu tak podobne aj v pripojenom stave je podpora pre výber bunky a pri pohybe znova výber ďalšej dostupnej bunky. LTE Cat-M zariadenie podporuje následovné mechanizmy pre podporu mobility v pripojenom stave: [2]

- handover,
- RRC uvoľnenie spojenia s následným presmerovaním,
- RRC znovu nadviazanie spojenia.

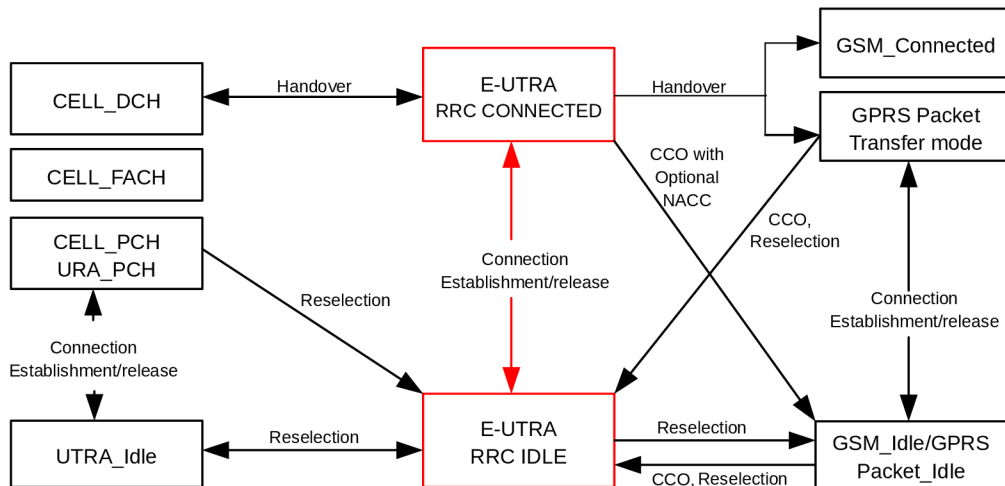
Zariadenie v pripojenom móde realizuje Radio Link Monitoring (RLM) pre získanie informácie, či je zariadenie synchronizované alebo nie je synchronizované voči bunke, v ktorej sa zariadenie nachádza. Informáciu o svojej synchronizácii získava meraním a porovnávaním CRS s prahovými hodnotami Q_{in} a Q_{out} . Samotné meranie sa vykonáva v časovom rozsahu, ktoré je označené ako hodnotiace obdobie. [2]

Pri zistení, že zariadenie nie je synchronizované počas určitého počtu opakovaní (jedná sa o nastaviteľný parameter N310) a za určitú dobu (po uplynutí doby nastavenej na časovači T310). Potom zariadenie vyhlási takzvaný Radio Link Failure (RLF) stav. Následne sa zariadenie môže pokúsiť o nájdenie a výber viacej vyhovujúcej bunky a začať realizovať nadviazanie nového (poprípade znova nadviazanie stávajúceho) spojenia. [2]

2.12 Charakteristika RRC v IDLE a Connected móde

Ako bolo popísané v sekciách 2.10 a 2.11. Zariadenie sa môže nachádzať v rôznych stavov. Jednotlivé stavy zariadenia závisia od aktuálnej potreby zariadenia na komunikáciu. V prípade, kedy je potrebný prenos sa zariadenia nachádza v Connected móde. V prípade, kedy zariadenie nevyžaduje (aj v dlhodobjšom časovom úseku) vysielanie dát sa zariadenie nachádza v IDLE móde. [2]

Jednotlivé RRC stavy je zobrazené na Obr. 2.26. Fungovanie IDLE a Connected módu bolo bližšie popísané v predchádzajúcich sekciách 2.10 a 2.11.



Obr. 2.26: RRC stavy v IDLE a Connected móde.

3 Sieťový simulačný nástroj NS-3

V nasledujúcej kapitole je charakterizovaný a popísaný sieťový simulačný nástroj Network Simulator 3 (NS-3). Bližšie je taktiež popísaný modul LENA, ktorý sa v NS-3 využíva pri simulácii siete typu LTE.

3.1 NS-3

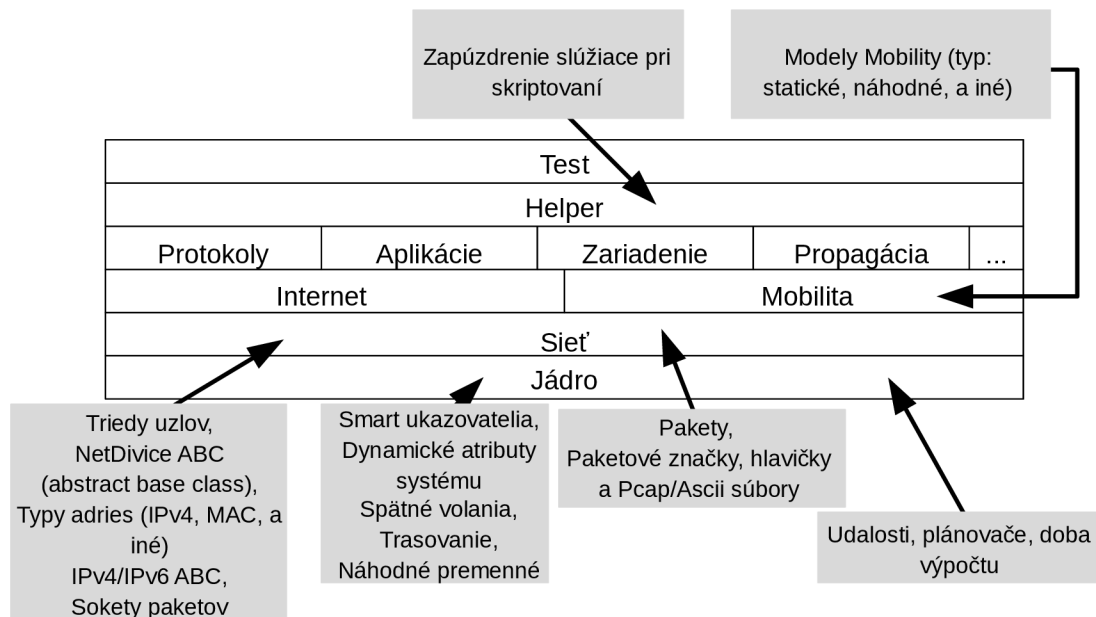
NS-3 je nástroj, ktorý typu "Discrete-Event". NS-3 nachádza využitie najmä vo výskume a školstve. Tento simulačný nástroj spadá pod licenciu General Public License version 2 (GNU GPLv2), čo znamená, že je verejne dostupný pre výskum a vývoj. NS-3 využíva programovací jazyk C++, na ktorom sú postavené moduly jadro a modely simulačného nástroja. NS-3 sa ako celok skladá z viacerých knihovní, ktoré je možné prepojiť (staticky alebo dynamicky) s hlavným programom C++ [21].

NS-3 zdrojový kód sa najčastejšie nachádza v zložke *src* a môže byť definovaná podľa Obr. 3.1. Jadro NS-3 sa nachádza v zložke *src/core*, ktoré obsahuje komponenty využívajúce vo všetkých protokoloch, modeloch. Pakety patria medzi najdôležitejšiu časť simulátoru, nachádzajú sa v zložke *src/network*. Tieto moduly sú nezávislé na použití v aktuálnom type modelu siete. Obecne sa definujú ako jadro simulačného nástroja. [21]

Základné typy sieťových komponentov, ktoré sa využívajú v NS-3 sú [22]:

- Node (uzol),
- Application (aplikácia),
- Network Device (sieťové zariadenie),
- Channel (kanál),
- Topology generátor (generátor topológie).

Uzol je charakterizovaný ako abstrakcia základného koncového zariadenia ako môže byť napríklad počítač. Uzly spadajú pod triedu `NODECONTAINER`, ktorá obsahuje metódy pre prácu s zariadeniami. Aplikácia je definovaná v triede `APPLICATION`, ktorá slúži k poskytovaniu aplikácií na užívateľskej úrovni. Sieťové zariadenie zabezpečuje funkcionality za hardware a software sieťovej karty. Kanál definuje prenos dát cez rôzne druhy média. [22]



Obr. 3.1: NS-3 model vrstiev. [21]

3.2 LENA modul

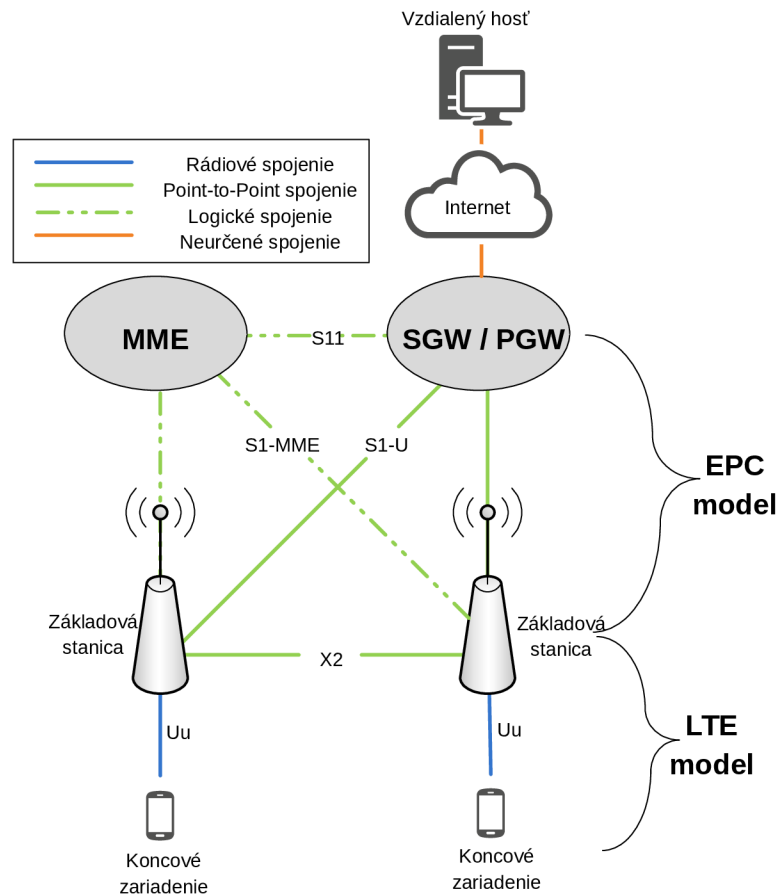
LTE/EPC Network SimulAtor (LENA) modul bol vyvinutý univerzitou Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CCTC) a je šírená pod open-source licenciou. Hlavným dôvodom vytvorenia LENA modulu bolo, čo najreálnejšie navrhovať a testovať LTE siete, ako napríklad vyvažovanie záťaže alebo Multi-Radio Access Technologies (Multi-RAT) sieťové riešenia a iné. Jedná sa o rozšírenie NS-3 simulátoru, preto je pre správnu činnosť LENA modulu vyžadovaný NS-3 simulátor. Na Obr. 3.2 je zobrazená infraštruktúra LTE siete s využitím modulu LENA. [23].

LENA modul je možné definovať dvoma hlavnými časťami [24]:

1. LTE model - disponuje protokolovou sadou LTE rádiového rozhrania: Radio Link Control (RLC), Medium Access Layer, Radio Resource Control, Packet Data Convergence Control (PDCP), Physical Layer.
2. EPC model - disponuje protokolmi, entitami a rozhraním jadra siete, ktoré sa nachádzajú v uzloch SGW, PGW, MME, a eNB.

Požiadavky na LTE model sú stanovené pre podporu a hodnotenie siete [24]:

- správa rádiových prostriedkov,
- koordinácia interferencií vo vnútri bunky,
- dynamický prístup ku spektru Dynamic Spectrum Access (DSA),
- plánovanie paketov s ohľadom na Quality of Service (QoS) službu.



Obr. 3.2: Charakteristika LENA modulu. [24]

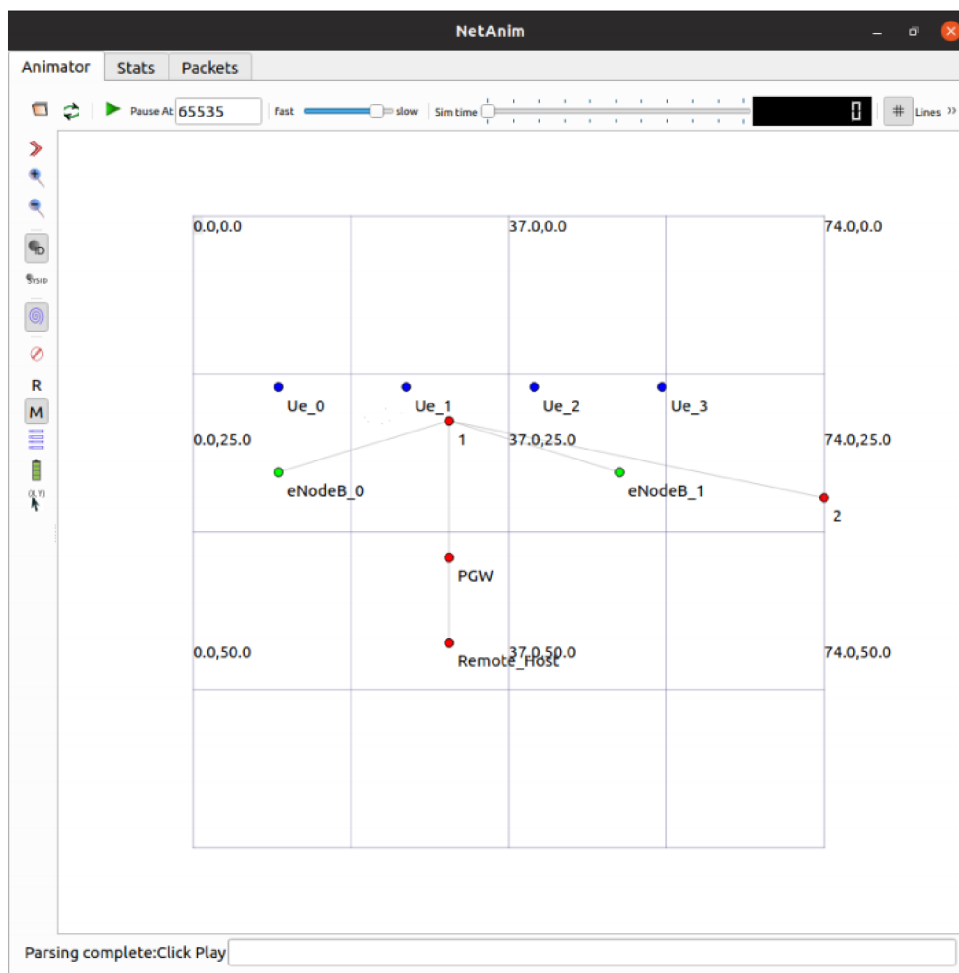
Pri konfigurovaní simulácie je možné nastavenie jednotlivých buniek tak, aby využívali rôzne frekvenčné nosné alebo šírky pásma. Možnosť nastavovať a definovať rôzne parametre LTE siete je výhodou, ktorá bude využitá pri implementácii LTE Cat-M technológie. [24]

4 Simulačný scenár

V nasledujúcej kapitole sú popísané jednotlivé scenáre, ktoré sú implementované a simulované v NS-3. Prvým scenárom je "Úvodný scenár", ktorý využíva LTE modul a od tohto scenára budú odvodené nasledujúce scenáre.

4.1 Úvodný scenár

V prvom kroku je vytvorený úvodný testovací scenár s využitím LENA modulu v simulačnom programe NS-3. Jedná sa o základnú konfiguráciu s preddefinovanými hodnotami pre overenie funkčnosti scenára. Sú využité 4 koncové zariadenia a 2 základové stanice. Dátový tok je generovaný jednoduchou Bulk aplikáciou.



Obr. 4.1: Ukážka úvodného scenára.

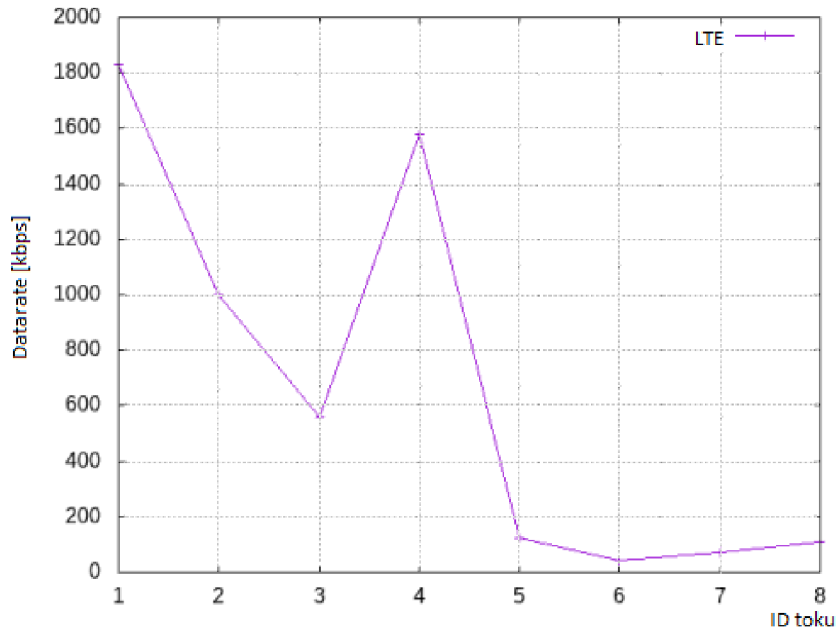
Na Obr. 4.1 je znázornená topológia úvodného scenára. Topológia pozostáva zo 4 LTE koncových zariadení (Ue_0 – Ue_3), 2 základových staníc (eNodeB_0 a eNodeB_1), PGW uzlu a vzdialeného hostiteľa (Remote_Host).

Parameter	Hodnota
Počet koncových zariadení (UE)	4
Počet základových staníc (eNodeB)	2
Počet vzdialených užívateľov	1
Čas simulácie	10 s
Periodicita signálu SRS	64 ms
Plocha rozmiestnenia UE	3750 m ²
Maximálna vzdialenosť UE od eNodeB	60 m
Inter packet interval	100 ms
Maximálny vysielací výkon UE	23 dBm
Šírka pásma	5,00 MHz
Využitý protokol transportnej vrstvy	TCP

Tab. 4.1: Hlavné parametre úvodného scenára.

Na Obr. 4.2 je znázornená priemerná dátová rýchlosť pre jednotlivé dátové toky v úvodnom scenári. Graf je vytvorený pomocou aplikácie Gnuplot z výstupných dát modulu FlowMonitor, ktorý slúži k získavaniu dát z merania výkonnosti sieťových protokolov.

Na Obr. 4.2 je vyobrazená priemerná dátová rýchlosť, z ktorej vyplýva, že pri parametroch úvodného scenára so 4 UE a 2 eNodeB zariadeniami je prenos dát dostatočne rýchly a nedochádza k výraznému poklesu rýchlosti prenášania dát.



Obr. 4.2: Priemerná dátová rýchlosť pre úvodný scenár.

Na Obr. 4.3 je znázornená topológia rozšíreného testovacieho scenáru. Rozšírený testovací scenár bude využitý ďalej v rámci diplomovej práce ako scenár pre implementáciu LTE Cat-M technológie.

Pri LTE Cat-M technológií a využití rozšíreného testovacieho scenára koncové zariadenia splňajú podmienku obmedzenej dátovej priepustnosti (menej ako 300 kb/s) a veľkého množstva pripojených koncových zariadení (UE) pripojených k jednej základovej stanici (eNodeB).

Pri rozšírenom scenáry sa tak vychádza z úvodného scenára avšak pre potreby simulácie LTE Cat-M technológie obsahuje viacej rádovo až stoviek koncových zariadení (konkrétne bolo definovaných 145 koncových zariadení) pripojených k jednej základovej stanici.



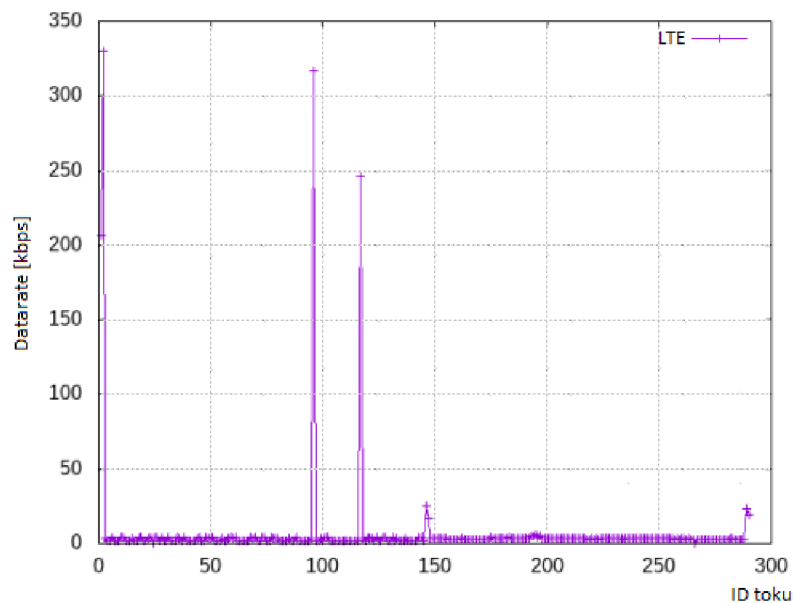
Obr. 4.3: Ukážka rozšíreného scenára.

Na Obr. 4.4 je znázornená priemerná dátová rýchlosť pre jednotlivé dátové toky v rozšírenom scenári. Pri rozšírenom scenári je možné v porovnaní s grafom na Obr. 4.2 pozorovať značné zníženie priemernej dátovej rýchlosti pre jednotlivé dátové toky. Toto zníženie nastáva najmä v dôsledku zvýšeného počtu nasadených UE zariadení v rozšírenom scenári. Zvýšený počet UE zariadení v rozšírenom scenári zodpovedá reálnemu stavu, kedy v mMTC scenároch môže byť k jednej základovej stanici pripojených až niekoľko stoviek UE zariadení.

Z Obr. 4.4 vyplýva, že zariadenia na začiatku a konci simulácie majú najvyššiu šancu dosiahnuť vyššej priemernej dátovej rýchlosti. Avšak väčšina UE zariadení dosahuje nízkej priemernej dátovej rýchlosti (okolo 10 kbs) v dôsledku zahltenia siete.

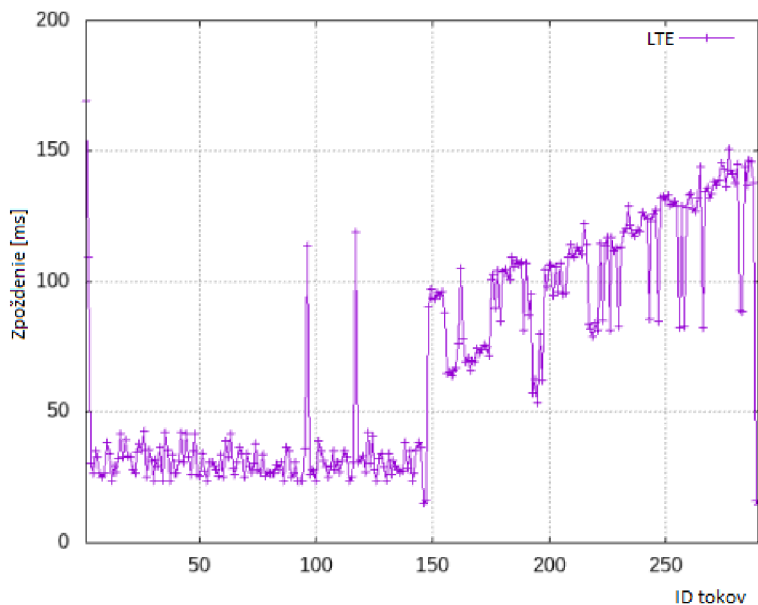
Parameter	Hodnota
Počet koncových zariadení (UE)	145
Počet základových staníc (eNodeB)	1
Počet vzdialených užívateľov	1
Čas simulácie	100 s
Periodicita signálu SRS	320 ms
Plocha rozmiestnenia UE	2,2 km^2
Maximálna vzdialenosť UE od eNodeB	1,5 km
Maximálny vysielací výkon UE	23 dBm
Počet PRB pre Uplink	6
Počet PRB pre Downlink	6
Šírka pásma	1,4 MHz
Inter packet interval	100 ms
Využitý protokol transportnej vrstvy	TCP

Tab. 4.2: Hlavné parametre rozšíreného scenára.



Obr. 4.4: Priemerná dátová rýchlosť pre rozšírený scenár.

Na Obr. 4.5 je znázornené oneskorenie jednotlivých dátových tokov. Z grafu tak vyplýva, že pri vzostupnom počte UE zariadení pripojených do siete sa zvyšuje aj oneskorenie. Oneskorenie stúpa najmä od určitého počtu (nad 100) UE zariadení, ako vyplýva z grafu, kedy sa oneskorenie pohybuje v rozmedzí 100 - 150 ms.



Obr. 4.5: Oneskorenie v závislosti na množstve zariadení pre LTE.

5 Meranie parametrov mMTC v NS-3

Nasledujúca časť sa zaoberá vplyvom počtu UE zariadení pripojených k jednej základovej stanici na parametre simulovanej siete v NS-3.

5.1 Závislosť počtu koncových zariadení na parametre simulovanej siete v NS-3

Základom pre získanie závislosti počtu UE zariadení na parametre siete je základný LTE simulačný scenár so základnými nastaveniami pre LENA modul (viz. Výpis 5.1). V simulačnom scenári je definovaný jeden server a jedna základová stanica, ku ktorej sa pripájajú UE zariadenia.

Výpis 5.1: Základné nastavenia pre simulačný scenár.

```
1 // pocet zariadeni v rozsahu 1 - 2500 UE zariadeni
2 uint16_t numberOfNodes = 1;
3 // vyuzitie len 1 Zakladovej Stanice
4 uint16_t numberOf_eNodeBs = 1;
5 //def 1.1 - doba simulacie 5 s
6 double simTime = 10;
7 double interPacketInterval = 100;
8
9 // Config SRS Periodicity
10 Config::SetDefault("ns3::LteEnbRrc::SrsPeriodicity",
11     UintegerValue(320));
12
13 PointToPointHelper p2ph;
14 p2ph.SetDeviceAttribute("DataRate", DataRateValue(DataRate("
15     100Gb/s")));
16 p2ph.SetDeviceAttribute("Mtu", UintegerValue(1500));
17 p2ph.SetChannelAttribute("Delay", TimeValue(Seconds(0.010)));
```

Vo Výpise 5.1 sú definované základné nastavenia pre simulačný scenár pre získanie závislosti počtu UE na parametre siete. Pre generovanie dátového toku bol využitý *BulkSendHelper* definovaný vo Výpise 5.2.

Výpis 5.2: Základné nastavenia BulkSendHelper pre generovanie dát.

```

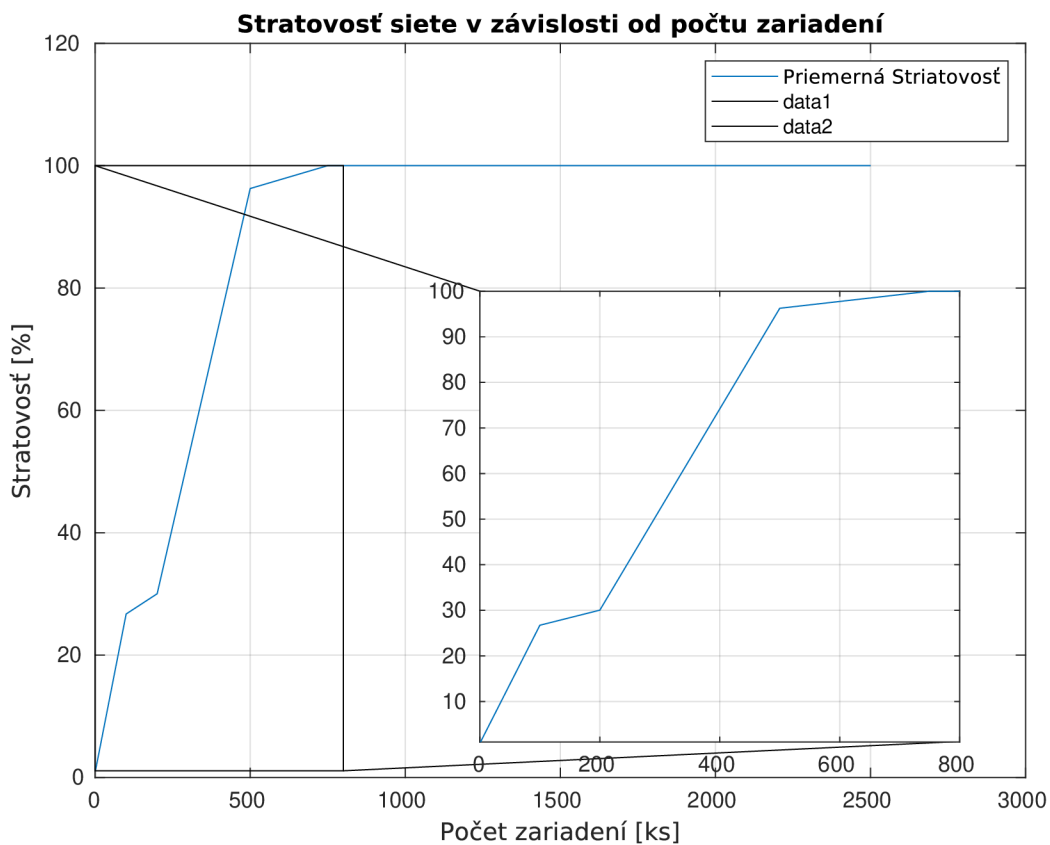
1 // Create a BulkSendApplication
2 uint16_t port = 9; // well-known echo port number
3
4 BulkSendHelper source ("ns3::TcpSocketFactory",
5     InetAddress (remoteHostAddr, port));
6
7 // Set the amount of data to send in bytes. Zero is
8 // unlimited.
9 source.SetAttribute ("MaxBytes", UintegerValue (0));
10
11 ApplicationContainer sourceApps;
12
13 for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++) {
14     sourceApps.Add(source.Install(ueNodes.Get(i)));
15 }
16
17 sourceApps.Start (Seconds (0.0));
18 sourceApps.Stop (Seconds (5.0));

```

V Tab. 5.1 sú dosiahnuté výsledky simulácie, z tabuľky vyplýva závislosť parametrov siete na počte pripojených UE zariadení. Konkrétne sa jedná o schopnosť prenášania dát v závislosti od počtu pripojených UE zariadení k jednej základovej stanici.

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná stratovosť [%]
1	1,09
100	26,72
200	30,03
500	96,26
750	100,00
1000	100,00
1500	100,00
1900	100,00
2500	100,00

Tab. 5.1: Priemerná stratovosť siete v závislosti od počtu UE zariadení.



Obr. 5.1: Priemerná stratovosť scenára v závislosti od počtu pripojených UE zariadení.

Z Obr. 5.1 je vyobrazená závislosť počtu pripojených UE zariadení k jednej základovej stanici. Prenos dát s nízkou stratovosťou sa pohyboval v rozpätí od 1 do 250 UE zariadení a od hodnoty 500 UE pripojených zariadení sa stratovosť pohybovala nad 95%. Od hodnoty 1000 UE zariadení sa stratovosť držala na hodnote 100%. Preto pre ďalšie simulácie sa bude uvažovať s využitím UE zariadení v rozsahu od 1 do 250 UE zariadení.

5.2 Meranie poklesu priepustnosti siete

V nasledujúcej časti bude definovaný pokles priepustnosti siete v závislosti od počtu pripojených UE zariadení k jednej základovej stanici. Rozsah UE zariadení bude od 1 do 250, čo je odvodené od získaných výsledkov zo sekcie sekcií 5.1.

5.2.1 Bulk aplikácia ako generátor dátového toku

Pre generovanie dátového toku sa využil BulkSendHelper. Základné nastavenie parametrov simulovanej siete vychádza z nastavení vo Výpise 5.1. Počet pripojených UE zariadení k jednej základovej stanici sa pohyboval v rozsahu od 1 do 250. Generovanie dátového toku za pomoci *BulkSendHelper* je definované vo Výpise 5.3. Kde je definované, že sa má generovať maximálny možný dátový tok a využíva sa TCP protokol.

Výpis 5.3: Základné nastavenia BulkSendHelper pre generovanie dát pre meranie priepustnosti.

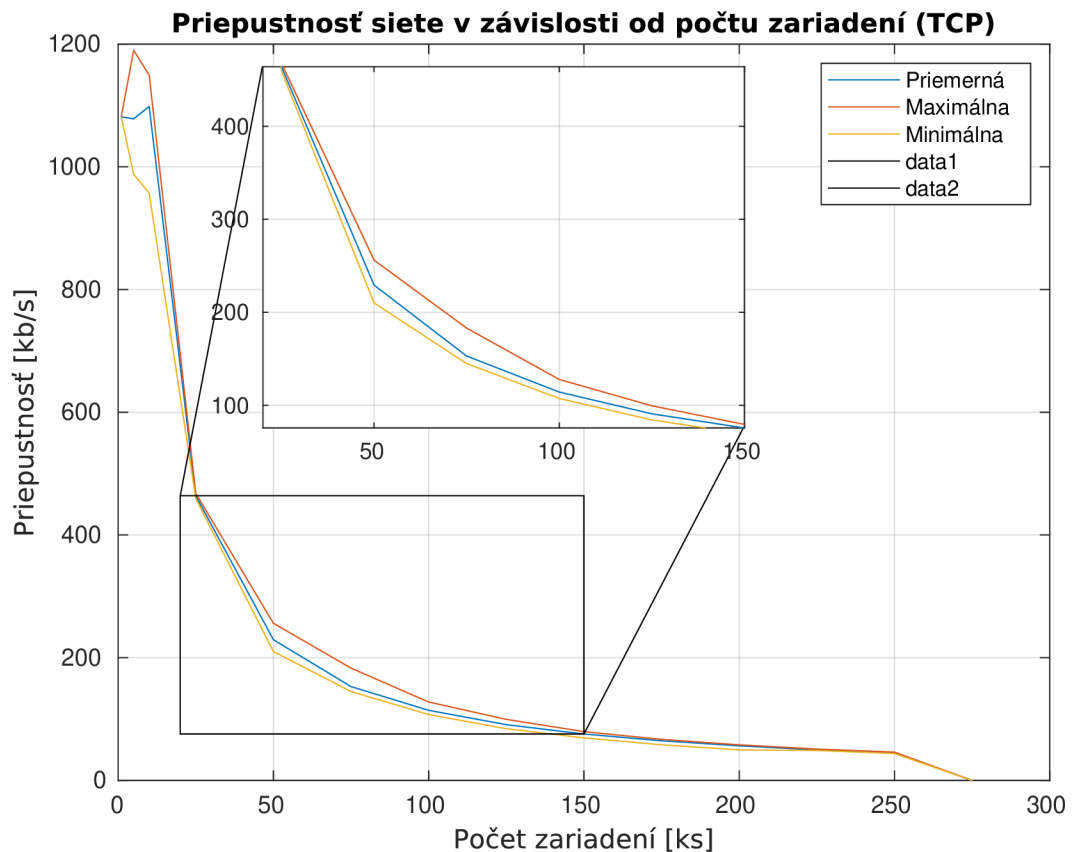
```
1 // Create a BulkSendApplication
2 uint16_t port = 9; // well-known echo port number
3
4 BulkSendHelper source ("ns3::TcpSocketFactory",
5     InetSocketAddress (remoteHostAddr, port));
6
7 // Set the amount of data to send in bytes. Zero is unlimited
8 source.SetAttribute ("MaxBytes", UintegerValue (0));
9
10 ApplicationContainer sourceApps;
11
12 for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++) {
13     sourceApps.Add(source.Install(ueNodes.Get(i)));
14 }
15
16 sourceApps.Start (Seconds (0.0));
17 sourceApps.Stop (Seconds (10.0));
18
19 // Create a PacketSinkApplication and install
20 PacketSinkHelper sink ("ns3::TcpSocketFactory",
21     InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), port));
22 ApplicationContainer sinkApps = sink.Install (remoteHost);
23 sinkApps.Start (Seconds (0.0));
24 sinkApps.Stop (Seconds (10.0));
```

V Tab. 5.2 sú dosiahnuté výsledky simulácie pre rôzny počet pripojených UE zariadení. Ako je vidno najväčšej priepustnosti sa dosiahlo pri jednom pripojenom UE zariadení. So zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení nastal podľa predpokladu pokles priepustnosti celej siete. Podľa definície kedy je základová stanica rozdelená na 3 sektory vychádza priemerne 80 UE zariadení na jeden sektor. Takéto rozdelenie zodpovedá do značnej miery definícií teoretického limitu možných pripojených UE zariadení k základovej stanici.

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná priepustnosť [kb/s]	Maximálna priepustnosť [kb/s]	Minimálna priepustnosť [kb/s]
1	1081,52	1081,52	1081,52
5	1078,09	1189,91	987,83
10	1098,29	1149,45	957,16
25	463,96	467,83	459,33
50	229,26	256,09	210,08
75	152,94	183,01	144,87
100	114,25	127,79	107,32
125	90,85	99,46	84,30
150	75,64	79,46	69,33
175	64,60	66,90	58,02
200	56,37	57,98	49,72
225	49,80	51,07	48,77
250	44,85	46,11	43,81
275	0,00	0,00	0,00

Tab. 5.2: Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím BulkSendHelper.

Na Obr. 5.2 je graf popisujúci priemernú, maximálnu a minimálnu priepustnosť pre simulovaný scenár. Graf popisuje trend, ktorý má klesajúci charakter so zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení. V rozsahu od 50 do 100 UE zariadení je vidno, že niektoré UE zariadenia boli schopné dosiahnuť vyšších rýchlostí v porovnaní s inými. Rozdiel rýchlostí sa v tomto prípade pohyboval okolo 15 kb/s.



Obr. 5.2: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím BulkSendHelper.

5.2.2 On-Off aplikácia ako generátor dátového toku

Pre generovanie dátového toku sa v tomto prípade využila *On-Off Aplikácia*. Základné nastavenie parametrov simulovanej siete vychádzajú z nastavení vo Výpise 5.1. Počet pripojených UE zariadení k jednej základovej stanici sa pohyboval v rozsahu od 1 do 250 UE zariadení. Generovanie dátového toku za pomoci On-Off Aplikácie je definované vo Výpise 5.4. Kedy sa na rozdiel od BulkSendHelper využil UDP protokol (pri využití TCP protokolu boli dosiahnuté výsledky podobné výsledkom s využitím *BulkSendHelper*).

Výpis 5.4: Základné nastavenia On-Off Aplikácie pre generovanie dát pre meranie priepustnosti.

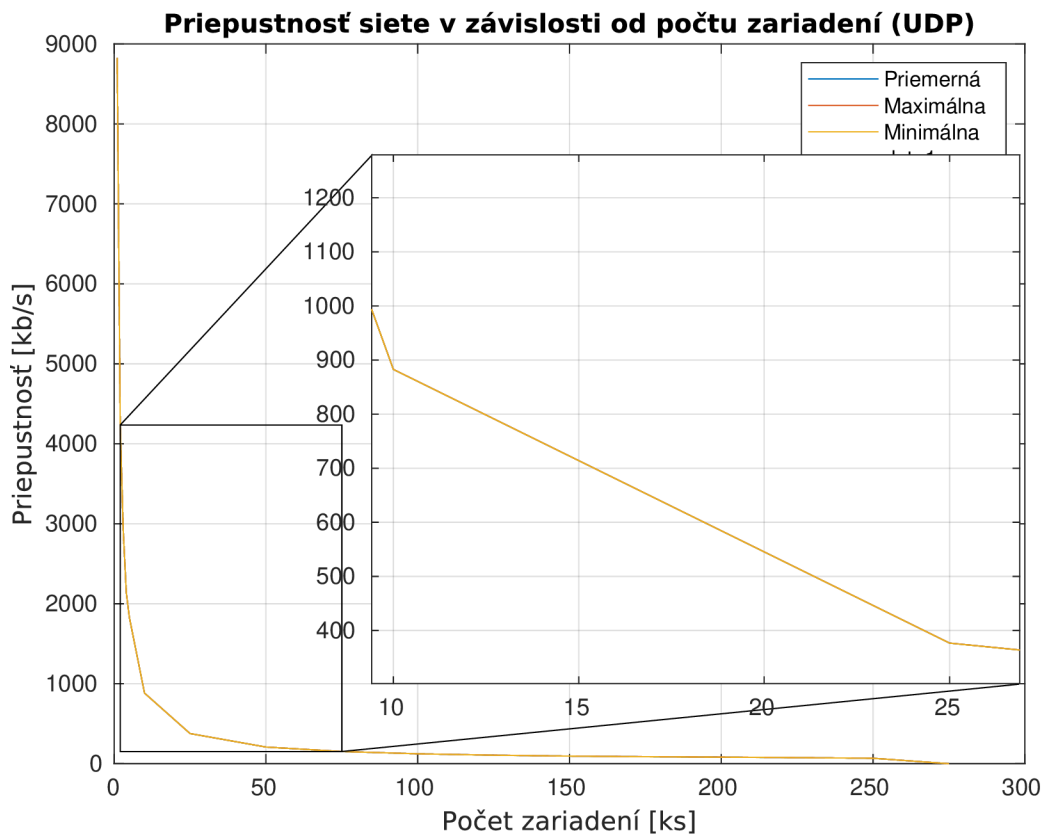
```
1 // Create a On-Off Appl
2 uint16_t portVoIP = 5060;
3
4 OnOffHelper onoff("ns3::UdpSocketFactory",Address(
    InetSocketAddress(remoteHostAddr, portVoIP)));
5 onoff.SetAttribute("DataRate", DataRateValue(DataRate("20Mbps
    "))); //10Mbps
6 onoff.SetAttribute("MaxBytes", UIntegerValue(uint32_t(1e7)));
7 onoff.SetAttribute("PacketSize", UIntegerValue(500));
8
9 ApplicationContainer serverApps;
10
11 for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); u++){
12     serverApps.Add(onoff.Install(ueNodes.Get(u)));
13 }
14
15 serverApps.Start(Seconds (0.01));
16
17 // Create a PacketSinkApplication and install
18 PacketSinkHelper sink("ns3::UdpSocketFactory",
    InetSocketAddress(remoteHostAddr, portVoIP));
19 ApplicationContainer clientApps = sink.Install (remoteHost);
20 clientApps.Start (Seconds (0.01));
```

V Tab. 5.3 sú dosiahnuté výsledky simulácie pre rôzny počet pripojených UE zariadení. Ako je vidno najväčšej priepustnosti sa dosiahlo pri jednom pripojenom UE zariadení. So zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení nastal podľa predpokladu pokles priepustnosti celej siete. Avšak celková priemerná priepustnosť v porovnaní s *BulkSendHelper* bola vyššia a viacej zodpovedala predpokladanej rýchlosti (minimálne pri jednom UE zariadení sa dosiahli predpokladané hodnoty rýchlosti).

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná priepustnosť [kb/s]	Maximálna priepustnosť [kb/s]	Minimálna priepustnosť [kb/s]
1	8825,63	8825,63	8825,63
2	4235,17	4235,17	4235,17
3	2904,51	2904,51	2904,51
4	2137,38	2137,38	2137,38
5	1830,71	1830,71	1830,71
10	882,66	882,71	882,60
25	376,68	376,74	376,60
50	208,00	208,08	207,92
75	152,06	152,51	151,85
100	123,63	123,72	123,54
125	106,10	106,62	105,66
150	94,79	94,90	94,68
175	87,25	87,69	86,99
200	81,74	82,33	81,39
225	75,61	75,80	75,42
250	67,94	68,07	67,80
275	0,00	0,00	0,00

Tab. 5.3: Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off App.

Na Obr. 5.3 je graf popisujúci priemernú, maximálnu a minimálnu priepustnosť pre simulovaný scenár. Graf popisuje trend, ktorý má klesajúci charakter so zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení. Je však badať, že pri nízkom počte pripojených UE zariadení sa dosahovali vysoké hodnoty priepustnosti (v porovnaní s *BulkSendHelper* až niekoľko násobne).



Obr. 5.3: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie.

5.2.3 On-Off aplikácia ako generátor dátového toku s rôznym časom vysielania

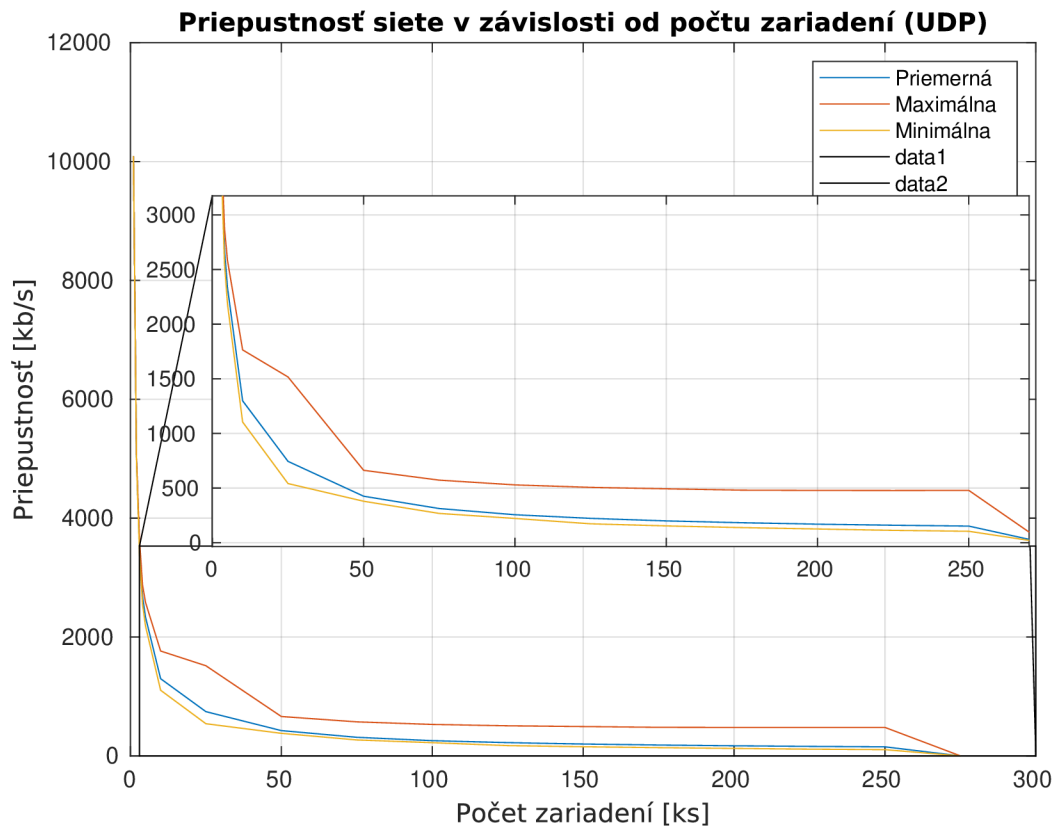
Pre generovanie dátového toku sa podobne ako v predchádzajúcej časti 5.2.2 využíva *On-Off Aplikácia* avšak v tomto prípade má každé UE zariadenie definovaný iný časový rámec, počas ktorého prebieha vysielanie dát. Základné nastavenie parametrov simulovanej siete vychádzajú z nastavení vo Výpise 5.1. Počet pripojených UE zariadení k jednej základovej stanici sa naďalej pohybuje v rozsahu od 1 do 250 UE zariadení. Generovanie dátového toku za pomoci *On-Off Aplikácie* je definované vo Výpise 5.5. Kedy sa na rozdiel od predchádzajúcej konfigurácie *On-Off Aplikácie* definovanej v časti 5.2.2 definuje aj časový rámec, počas ktorého prebieha prenos dát.

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná priepustnosť [kb/s]	Maximálna priepustnosť [kb/s]	Minimálna priepustnosť [kb/s]
1	10088,90	10088,90	10088,90
2	5003,17	5048,39	4957,95
3	3529,56	3650,89	3408,66
4	2686,66	2876,41	2553,56
5	2334,72	2582,04	2183,49
10	1298,79	1764,59	1104,58
25	744,49	1516,84	541,31
50	425,48	662,61	379,48
75	312,72	572,53	267,93
100	256,02	529,13	222,19
125	222,97	506,51	173,05
150	199,55	493,37	153,87
175	182,93	481,08	138,31
200	169,87	478,84	125,69
225	159,95	477,97	112,96
250	152,22	479,08	104,76
275	0,00	0,00	0,00

Tab. 5.4: Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s rôznym časovým rámcom vysielania dát.

V Tab. 5.4 sú dosiahnuté výsledky simulácie pre rôzny počet pripojených UE zariadení s rôznym časom vysielania dát UE zariadenia. Ako je vidno najväčšej priepustnosti sa dosiahlo pri jednom pripojenom UE zariadení. So zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení nastal podľa predpokladu pokles priepustnosti celej siete. S využitím definície časového rámca, kedy každé UE zariadenie vysiala dáta sa v porovnaní s *On-Off Aplikáciou*, ktorá bola definovaná v časti 5.2.2, nastalo

lepšie využitie sieťových prostriedkov.

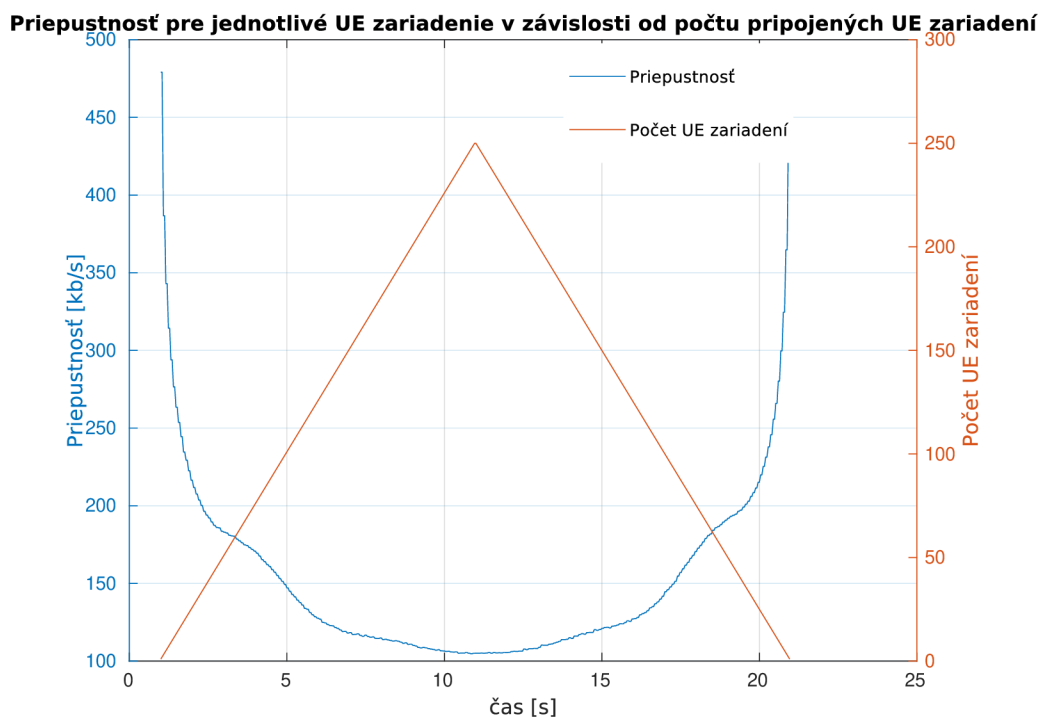


Obr. 5.4: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a rôznym časovým rámcom vysielania dát.

Na Obr. 5.4 je graf popisujúci priemernú, maximálnu a minimálnu priepustnosť pre simulovaný scenár. Graf popisuje trend, ktorý má klesajúci charakter so zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení. V porovnaní s grafom definovaným na Obr. 5.3 je vidno, že pri definovaní časového rámca, kedy každé UE zariadenie vysiela v rôznom časovom rámci nastalo navýšenie priemernej, maximálnej a minimálnej priepustnosti.

Výpis 5.5: Základné nastavenia On-Off Aplikácie pre generovanie dát s definovaným časovým rámcom vysielania dát.

```
1 // Create a On-Off Appl
2 uint16_t portVoIP = 5060;
3
4 OnOffHelper onoff("ns3::UdpSocketFactory", Address(
    InetSocketAddress(remoteHostAddr, portVoIP)));
5 onoff.SetAttribute("DataRate", DataRateValue(DataRate("20Mbps
    ")));
6 onoff.SetAttribute("MaxBytes", UIntegerValue(uint32_t(1e7)));
7 onoff.SetAttribute("PacketSize", UIntegerValue(500));
8
9 ApplicationContainer serverApps;
10
11 for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); u++)
12 {
13     serverApps.Add(onoff.Install(ueNodes.Get(u)));
14 }
15
16 ApplicationContainer::Iterator i;
17 double StartApp = 1.0;
18 double StopApp = 10.0;
19
20 for (i = serverApps.Begin(); i != serverApps.End(); ++i)
21 {
22     (*i)->SetStartTime(Seconds (StartApp));
23     (*i)->SetStopTime(Seconds (StopApp)); //(10.00));
24
25     StartApp = StartApp + 0.04;
26     StopApp = StopApp + 0.04;
27 }
28
29 // zpracovani provozu klienta smerem od serveru
30 PacketSinkHelper sink("ns3::UdpSocketFactory",
    InetSocketAddress(remoteHostAddr, portVoIP));
31 ApplicationContainer clientApps = sink.Install (remoteHost);
32 clientApps.Start (Seconds (0.01));
```



Obr. 5.5: Graf popisujúci priepustnosť UE zariadenia v čase v závislosti na postupnom pripájaní UE zariadení.

Na Obr. 5.5 je graf popisujúci priepustnosť UE zariadenia v čase, kedy sa postupne pripájali UE zariadenia. Jedná sa o časový rámec od 1. sekundy po 21. sekundu simulácie (celá simulácia bola definovaná časovým rámcom rovným 25 sekund). Z Obr. 5.5 vyplýva, že najmenej priepustnosti sa dosahovalo v strede časového rámca (od 8 do 13 sekundy), kedy boli pripojené všetky UE zariadenia. V začiatku a konci simulácie dosahovali UE zariadenia najvyššej priepustnosti (v rozmedzí 400 až 500 kbs) vďaka menšej vyťaženosti siete.

5.2.4 Porovnanie odlišnej konfigurácie On-Off aplikácie ako generátora dátového toku

V nasledujúcej časti je popísaný rozdiel medzi On-Off aplikáciou, konkrétne, keď UE zariadenia vysielajú dáta v rovnaký a rôzny čas.

V Tab. 5.5 sú porovnané dva rôzne varianty On-Off Aplikácie. Tabuľka porovnáva priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu pripojených UE zariadení pri vysielaní dát v rovnakom čase pre všetky UE zariadenia a pri vysielaní dát, keď UE zariadenia vysielajú v rôznom časovom rámci.

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná Priepustnosť s rovnakým časom vysielania dát [kb/s]	Priemerná Priepustnosť s rôznym časom vysielania dát [kb/s]
1	8825,63	10088,90
2	4235,17	5003,17
3	2904,51	3529,56
4	2137,38	2686,66
5	1830,71	2334,72
10	882,67	1298,79
25	376,68	744,49
50	208,01	425,48
75	152,07	312,72
100	123,63	256,02
125	106,10	222,97
150	94,79	199,55
175	87,26	182,93
200	81,75	169,87
225	75,61	159,95
250	67,95	152,22
275	0,00	0,00

Tab. 5.5: Porovnanie On-Off Aplikácií s rovnakým a rôznym časom vysielania dát a následný vplyv na priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení.

Z Tab. 5.5 je vidno vplyv odlišnej konfigurácie On-Off App a teda, že pri správnom rozvrhnutí vysielania dát pre každé UE zariadenie je možné dosiahnuť vyššej priemernej priepustnosti ako tomu je pri vysielaní dát v rovnakom čase pre všetky UE zariadenia.

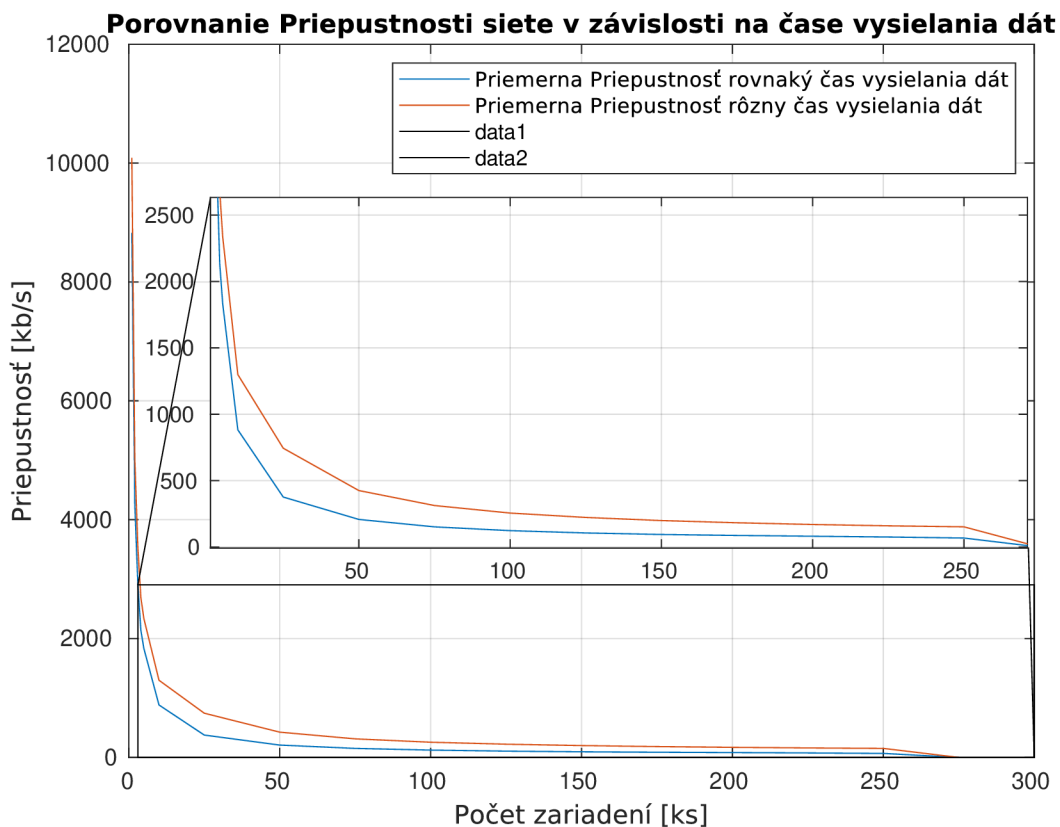
Pri počte zariadení v rozsahu od 1 do 10 UE zariadení sa pohyboval nárast priemernej priepustnosti na úrovni od 14,31% do 47,14% .

Najväčší nárast nastal pri väčšom počte pripojených UE zariadení. Nárast priemernej priepustnosti sa pohyboval na úrovni od 97,64% do 124,02%. Pri 250 UE zariadeniach a vysielaní dát v rovnakom čase pre všetky pripojené UE zariadenia bola priemerná priepustnosť na úrovni 67,95 kb/s. Pri 250 UE zariadeniach a vysielaní dát v rôznom čase pre pripojené UE zariadenia bola priemerná priepustnosť na

úrovni 152,22 kb/s. Pri využití rôzneho času vysielania dát pre UE zariadenia tak nastal takmer 2,25 násobný nárast priemernej priepustnosti.

Pri počte 50 UE pripojených zariadení a využití rozostupu 0,04s a 0,20s pri začatí vysielania dát došlo k citelnému nárastu priemernej priepustnosti. Pri využití rozostupu 0,04s pri začatí vysielania dát bola priemerná priepustnosť na úrovni 425,48 kb/s, čo je v porovnaní s vysielaním v rovnaký čas (208,01 kb/s) viac ako 2,05 násobné navýšenie priemernej priepustnosti. Pri využití rozostupu 0,20s pri začatí vysielania dát bola priemerná priepustnosť na úrovni 806,77 kb/s, čo je v porovnaní s rozstupom 0,04s (425,48 kb/s) navýšenia na úrovni 1,89-násobku priemernej priepustnosti a v porovnaní s vysielaním v rovnaký čas (208,01 kb/s) viac ako 3,88 násobné navýšenie priemernej priepustnosti.

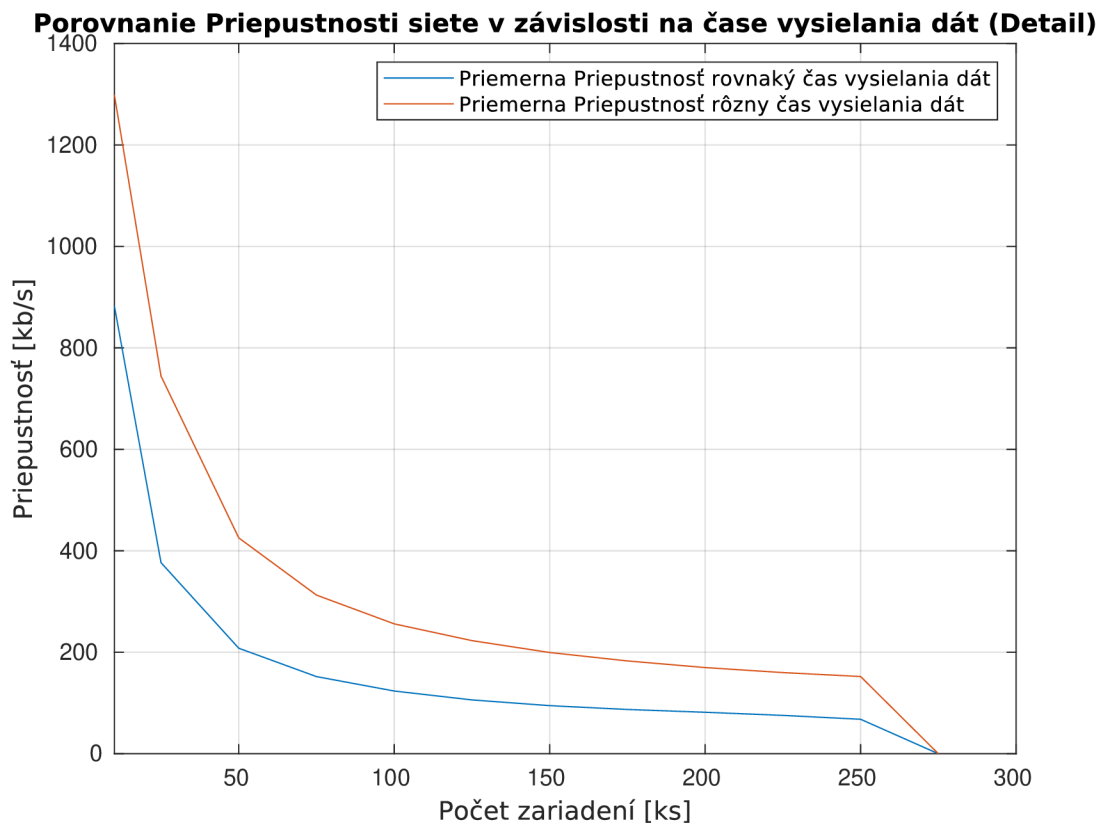
Využitie rozdielnych rozstupov pri vysielaní dát tak má vplyv na priemernú priepustnosť siete. Z toho vyplýva, že pri známom počte pripojených UE zariadení a definovanom časovom okne je možné lepšie definovať rozstupy pri vysielaní dát a získať tak lepšiu priepustnosť siete.



Obr. 5.6: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a vysielaniu dát v rovnakom a rôznom časovom rámci.

Obr. 5.6 popisuje graf priemernej priepustnosti pre simulovaný scenár s využitím vysielania dát v rovnaký a rôzny čas. Z graf tak vyplýva, že správnym nastavením času, kedy jednotlivé UE zariadenia vysielajú dáta je možné doceliť lepšej priepustnosti siete.

Pretože ako vyplýva z Obr. 5.6 väčší nárast priemernej priepustnosti je v rozsahu od 10 do 250 UE pripojených zariadení je na Obr. 5.7 detailnejší pohľad na nárast priemernej priepustnosti siete. Kedy od 50 do 250 UE pripojených UE zariadení došlo minimálne k dvoj-násobnému navýšeniu priemernej priepustnosti (napr. zo 67,95 kb/s na 152,22 kb/s zhruba 2,24-násobne navýšenie).



Obr. 5.7: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a vysielaniu dát v rovnakom a rôznom časovom rámci pre rozsah UE od 10 do 250.

5.3 Vplyv nastavenia siete na parametre siete

V nasledujúcej časti budú definované vplyvy na výsledné parametre siete pri zmene základných nastavení simulovanej siete. Hlavnou zmenou je zmena šírky pásma (bandwidth), ktorá sa využíva pri simulovaní siete.

5.3.1 Overenie základného nastavenia simulovanej siete

Pre pokračovanie a ďalšie nastavenie simulovanej siete (zmenu šírky pásma) je potrebné si overiť, aká je nastavená základná (default) hodnota šírky pásma pre simulovanú sieť v LENA modulu.

Výpis 5.6: Nastavenie šírky pásma na hodnotu 5 MHz.

```
1 // Definition of PRBs
2 Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::UlBandwidth",
3     StringValue("25")); // 5 MHz
4 Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::DlBandwidth",
5     StringValue("25")); // 5 MHz
```

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná Priepustnosť pre základne nastavenie [kb/s]	Priemerná Priepustnosť pre nastavenú šírku pásma 5 MHz [kb/s]
1	10088,90	10088,90
10	1298,79	1298,79
50	425,48	425,48
100	256,02	256,02
200	169,87	169,87
250	152,22	152,22

Tab. 5.6: Overenie základnej (default) šírky pásma využívanej v simulovanom scenári.

Vo Výpise 5.6 je definícia nastavenia šírky pásma pre simulovaný scenár na hodnotu 5 MHz. Definícia šírky pásma je realizovaná pomocou nastavenia počtu PRB. Pre definovanie šírky pásma 5 MHz je potrebné nastaviť 25 PRB. Definícia PRB je bližšie popísaná v časti 2.5.2.

Predpoklad, že LENA modul má základnú šírku pásma nastavenú na hodnotu 5 MHz je potvrdený a overený nastavením šírky pásma na hodnotu 5 MHz vo Výpise 5.6 a porovnaním získaných údajov z Tab. 5.6. Z údajov tak vyplýva, že bez nastavenia šírky pásma alebo s nastavením šírky pásma na hodnotu 5 MHz sa získajú zhodné výsledky.

5.3.2 Parametre siete pri nastavení simulovanej siete pre LTE Cat-M technológiu

V nasledujúcej sekcii je definovaný simulovaný scenár pre LTE Cat-M technológiu. Tieto zmeny na nastavení simulovanej siete je potrebné vykonať, pretože ako bolo popísané v predchádzajúcej sekcii 5.3.1 základne nastavenia LENA modulu nekorešpondujú s nastaveniami potrebnými pre LTE Cat-M technológiu.

Vo Výpise 5.7 sú definované základne nastavenia pre simulovanú sieť tak aby spĺňala definíciu LTE CAT-M technológie, ktorá je bližšie popísaná v sekcii 2. Po vykonaní viacerých simulácií s rôznymi kombináciami nastavení parametrov definovaných vo Výpise 5.7 je zrejme, že definícia šírky pásma je hlavným parametrom, ktorý ovplyvnil celkové parametre simulovanej siete. Ku príkladu parameter *ns3::LteUePhy::TxPower* nemal na parametre simulovanej siete významný vplyv. A to hlavne z dôvodu, že všetky UE zariadenia sa nachádzali v blízkosti základovej stanice, nebol realizovaný prenos na veľkú vzdialenosť.

Výpis 5.7: Nastavenie šírky pásma a ďalších hodnôt, ktoré definujú LTE CAT-M technológiu.

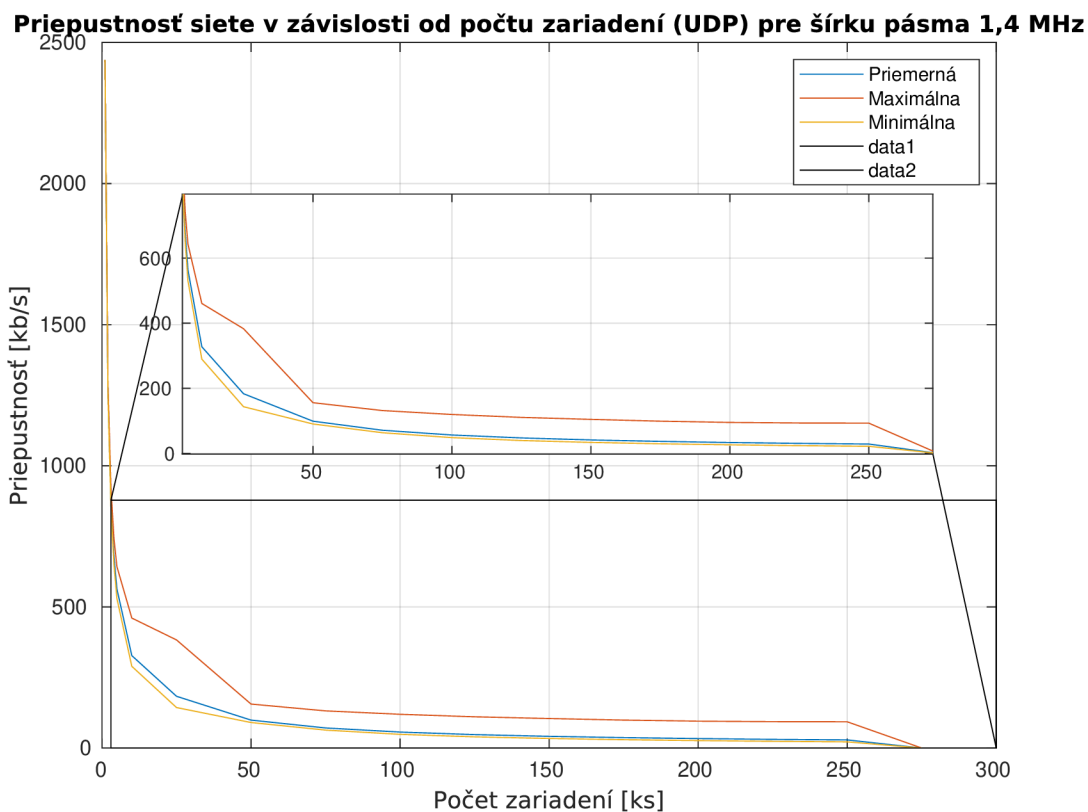
```
1 // Config LTE Cat-M1
2 if (useConfig) {
3     Config::SetDefault("ns3::LteUePhy::TxPower", StringValue(
4         "23")); //23dBm
5     Config::SetDefault("ns3::LteUePhy::NoiseFigure",
6         StringValue("9")); // def 9
7     Config::SetDefault("ns3::LteEnbPhy::TxPower", DoubleValue
8         (46.0)); //46dBm
9     Config::SetDefault("ns3::LteEnbPhy::NoiseFigure",
10        StringValue("5")); //def 5
11    Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::UlBandwidth",
12        StringValue("6")); // 1,4 MHz
13    Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::DlBandwidth",
14        StringValue("6")); // 1,4 MHz
15    Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::DlEarfcn",
16        StringValue("100"));
17    Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::UlEarfcn",
18        StringValue("18100"));}
```

V Tab. 5.7 sú dosiahnuté výsledky simulácie pri nastavení pre LTE Cat-M1 technológiu. Ako je vidno najväčšej priepustnosti sa dosiahlo pri jednom pripojenom UE zariadení. So zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení, podobne ako tomu bolo pri základnom nastavení LENA modulu došlo k poklesu priepustnosti celej siete. Simulácia využívala podobné nastavenie generovania dát ako tomu bolo v časti 5.2.3. Avšak v dôsledku zmien základných nastavení došlo k poklesu priemernej priepustnosti.

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná priepustnosť [kb/s]	Maximálna priepustnosť [kb/s]	Minimálna priepustnosť [kb/s]
1	2437,67	2437,67	2437,67
2	1269,71	1291,78	1247,63
3	878,31	921,89	853,40
4	680,72	743,52	651,89
5	563,87	643,03	530,02
10	327,53	460,58	289,61
25	183,40	383,08	143,48
50	98,99	155,81	90,43
75	71,18	131,67	63,56
100	56,62	119,62	48,51
125	47,60	110,69	39,61
150	41,44	104,60	33,85
175	36,97	99,04	29,61
200	33,52	95,27	26,40
225	30,85	93,50	23,91
250	28,83	93,03	21,90
275	0,00	0,00	0,00

Tab. 5.7: Priemerná priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off App nastaveniami pre LTE Cat-M technológiu.

Na Obr. 5.8 je graf popisujúci priemernú, maximálnu a minimálnu priepustnosť pre simulovaný scenár s využitím nastavenia pre LTE Cat-M1 technológiu. Na Obr. 5.8 je vyobrazený graf je vyobrazený trend, ktorý má klesajúci charakter so zvyšujúcim sa počtom pripojených UE zariadení.



Obr. 5.8: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od počtu UE zariadení s využitím On-Off Aplikácie a nastavení pre LTE Cat-M technológiu.

5.3.3 Vplyv základných nastavení na parametre siete

V nasledujúcej časti je porovnaný vplyv na parametre siete pri zmene základných nastavení simulovanej siete. Porovnaný bude vplyv na parametre simulovanej siete (priepustnosť) v závislosti na zvolenej šírke pásma a ďalších zmien simulovanej siete.

V Tab. 5.8 sú porovnané dosiahnuté priepustnosti pre simulovaný scenár pre šírku pásma 5 MHz a 1,4 MHz. V tabuľke sú porovnané priemerné priepustnosti simulovanej siete podľa zvolenej šírky pásma. Z Tab. 5.8 tak vyplýva, že pri LTE Cat-M1 technológií sa dosahuje nižšej priepustnosti, čo je správny záver, keďže LTE Cat-M1 technológia v porovnaní s LTE technológiou dosahuje nižších prenosových rýchlostí.

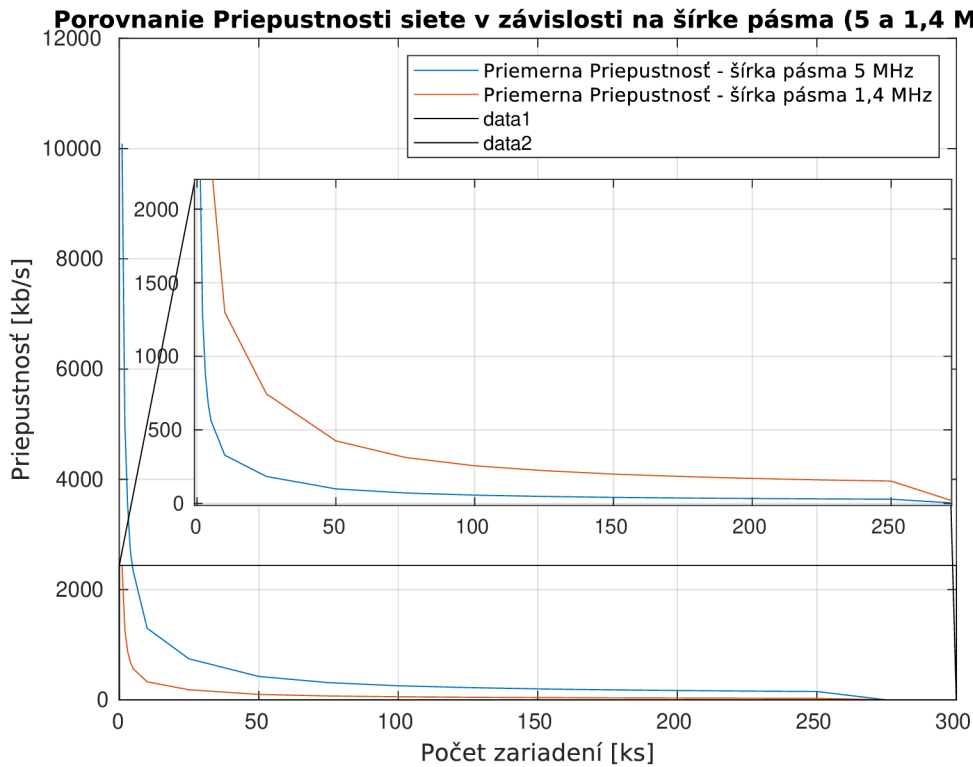
Pokles priepustnosti pre šírku pásma 1,4 MHz bol v porovnaní so šírkou pásma 5 MHz v rozsahu od 74,62 % do 81,06 %.

Pri 250 UE zariadeniach a využitej šírky pásma 5 MHz (default) bola priemerná priepustnosť na úrovni 152,22 kb/s. Pri 250 UE zariadeniach a využitej šírky pásma

1,4 MHz (pre LTE Cat-M1) bola priemerná priepustnosť na úrovni 28,83 kb/s. Došlo tak k takmer 5,28-násobnému poklesu priemernej priepustnosti siete.

Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná Priepustnosť pre nastavenú šírku pásma 5 MHz [kb/s]	Priemerná Priepustnosť pre nastavenú šírku pásma 1,4 MHz [kb/s]
1	10088,90	2437,67
2	5003,17	1269,71
3	3529,56	878,31
4	2686,66	680,72
5	2334,72	563,87
10	1298,79	327,53
25	744,49	183,40
50	425,48	98,99
75	312,72	71,18
100	256,02	56,62
125	222,97	47,60
150	199,55	41,44
175	182,93	36,97
200	169,87	33,52
225	159,95	30,85
250	152,22	28,83
275	0,00	0,00

Tab. 5.8: Porovnanie priemernej priepustnosti pre šírku pásma 5 a 1,4 MHz.

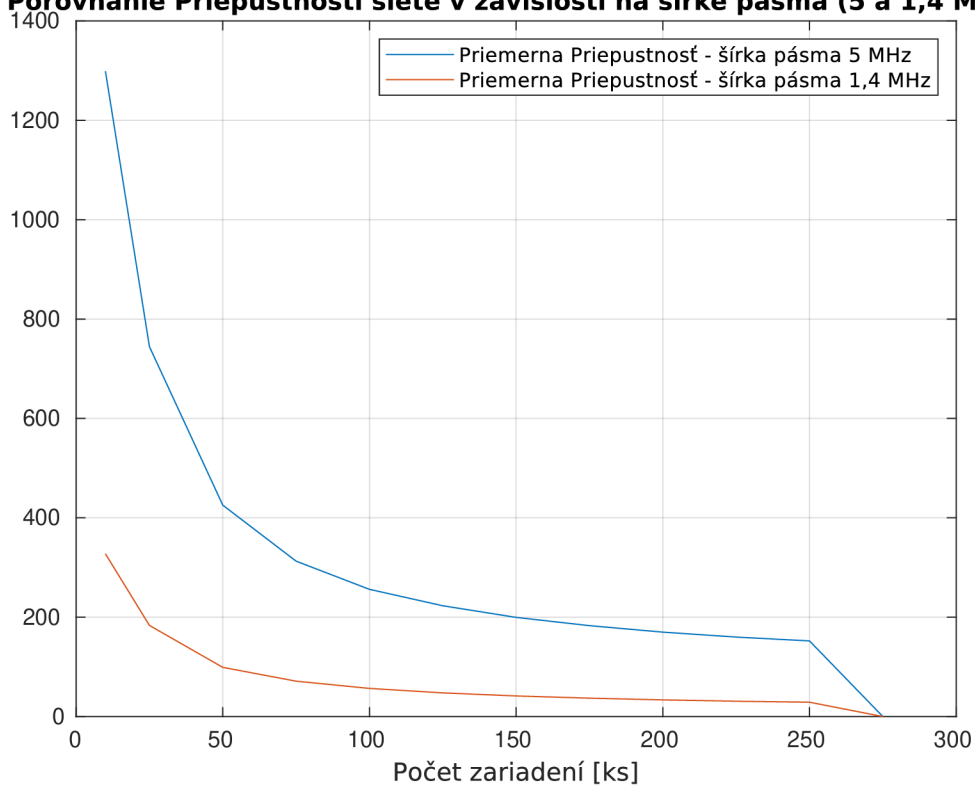


Obr. 5.9: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od využitej šírky pásma.

Na Obr. 5.9 je graf, ktorý popisuje priemernú priepustnosť pre simulovaný scenár v závislosti od využitej šírky pásma. Z grafu tak vyplýva, že pri zmenšenej šírke pásma na hodnotu 1,4 MHz správne došlo k poklesu priemernej priepustnosti.

Na Obr. 5.10 je graf, ktorý popisuje bližšie priemernú priepustnosť pre simulovaný scenár v závislosti od využitej šírky pásma pre rozsah UE zariadení od 10 do 250 UE zariadení. Jedná sa o detailnejší náhľad na pokles priemernej priepustnosti pri využití šírky pásma 1,4 MHz v porovnaní so šírkou pásma 5 MHz.

Porovnanie Priepustnosti siete v závislosti na šírke pásma (5 a 1,4 MHz)



Obr. 5.10: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od využitej šírky pásma pre UE zariadenia od 10 do 250.

6 RRC stavy v simulačnom programe NS-3

Nasledujúca časť sa zaoberá definíciou a konfiguráciou RRC stavov v simulačnom programe NS-3. Cieľom konfigurácie RRC stavov je fungovanie simulačného programu NS-3 podľa podmienok definovaných v kapitole 2.

6.1 Popis RRC stavov v simulačnom programe NS-3

V simulačnom programe NS-3 sú RRC stavy definované v *lte-enb-rrc.cc* a v *lte-ue-rrc.cc*. Pre získanie základnej znalosti ako RRC stavy fungujú v základnom nastavení bol realizovaný výpis jednotlivých RRC stavov v priebehu celej simulácie. Získanie výpisu RRC stavov bolo realizované pomocou časti kódu, ktorý získal stav UE zariadenia a následne ho zapíše do logu. Využitá časť kódu je definovaná vo Výpise 6.1.

Výpis 6.1: Získanie aktuálneho RRC stavu a následný výpis pre UE zariadenie.

```
1  /// Namapovanie jednotlivých RRC stavov pre UE zariadenie.
2  static const std::string g_ueRrcStateName[LteUeRrc::
    NUM_STATES] = {
3      "IDLE_START", "IDLE_CELL_SEARCH", "IDLE_WAIT_MIB_SIB1",
4      "IDLE_WAIT_MIB", "IDLE_WAIT_SIB1", "IDLE_CAMPED_NORMALLY",
5      "IDLE_WAIT_SIB2", "IDLE_RANDOM_ACCESS", "IDLE_CONNECTING",
6      "CONNECTED_NORMALLY", "CONNECTED_HANDOVER",
7      "CONNECTED_PHY_PROBLEM", "CONNECTED_REESTABLISHING" };
8
9  // Vratenie aktualneho RRC stavu UE zariadenia
10 static const std::string & ToString(LteUeRrc::State s) {
11     return g_ueRrcStateName[s]; }
12
13 // Výpis aktualneho RRC stavu UE zariadenia
14 void GetUERRCstate(NetDeviceContainer ueNodes) {
15     Ptr < LteUeNetDevice > ueLteDevice;
16     uint64_t imsi;
17     LteUeRrc::State state;
18     for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN(); ++u) {
19         ueLteDevice = ueNodes.Get(u) ->GetObject<LteUeNetDevice>();
20         imsi = ueLteDevice ->GetImsi();
21         state = ueLteDevice ->GetRrc() ->GetState();
22         std::cout << "Imsi:" << imsi << "State:" << ToString(
            state) << std::endl;
23     }
24 }
```

Po vykonaní simulácie boli zistené jednotlivé RRC stavy pre každé pripojené UE zariadenie k základovej stanici. Pripojenie všetkých UE zariadení bolo vykonané v prvej sekunde simulácie a zostali pripojené až do konca simulácie.

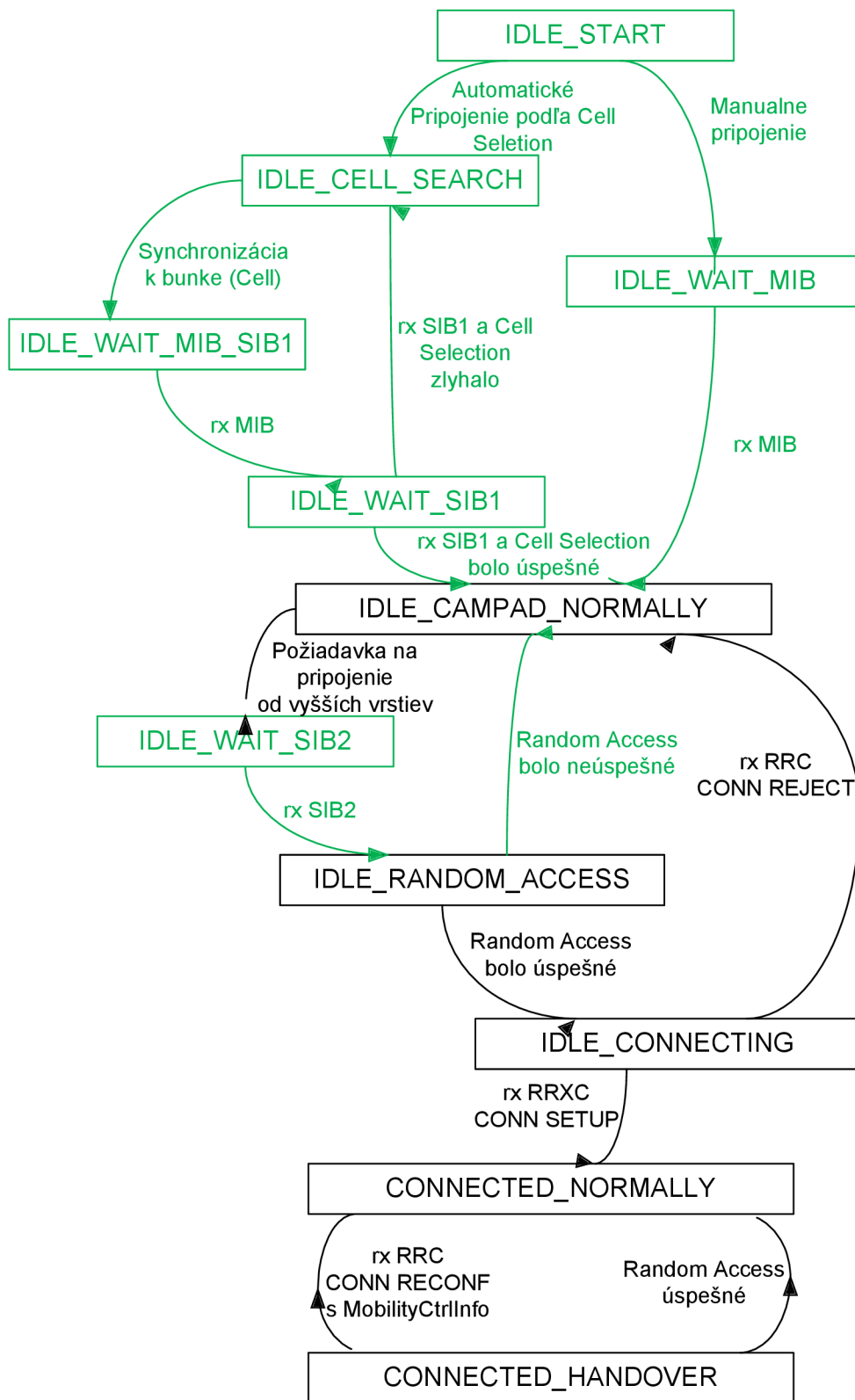
Definícia RRC stavov v simulačnom programe NS-3 je popísaná na Obr. 6.1. V základnom nastavení UE zariadenie po úspešnom pripojení k základovej stanici zostáva v RRC stave *CONNECTED_NORMALLY*. Pre ďalšie simulácie je potrebné jednotlivé UE zariadenia prepnúť do RRC stavu *IDLE_CAMPED_NORMALLY*, pretože v stave *CONNECTED_NORMALLY* UE zariadenia (aj po skončení vysielania dát) stále zaberá dostupné prostriedky základovej stanice.

V sekcii 5.1 bol zistený maximálny počet UE zariadení pripojených k jednej základovej stanici. Pre bezproblémový priebeh simulácie bolo zistené, že k jednej základovej stanici môže byť pripojených maximálne 250 UE zariadení. Tento počet UE zariadení je však pre LTE Cat-M technológiu nedostačujúci a preto je potrebné UE zariadenia, pre ktoré aktuálne nedochádza k vysielajú dát prepnúť do RRC stavu *IDLE_CAMPED_NORMALLY* vďaka čomu je následne možné k jednej základovej stanici pripojiť väčší počet UE zariadení.

Pre uvedenie UE zariadenia do požadovaného RRC stavu *IDLE_CAMPED_NORMALLY* v prípade, keď nedochádza k vysielaniu dát je potrebné odpojenie UE zariadenia. Pre odpojenie UE zariadenia boli využité definované mechanizmy pre odpojenie UE zariadenia od základovej stanice.

Po odpojení UE zariadenia a overení RRC stavu UE zariadenia v logu bolo zistené, že dostupné mechanizmy UE zariadenie síce odpoja od základovej stanice ale v zápäť dochádza k znovu pripojeniu UE zariadenia k základovej stanici.

Pre požadované správne odpojenie UE zariadenia (uvedenie UE zariadenia do RRC stavu *IDLE_CAMPED_NORMALLY*) sú potrebné zmeny v kóde, ktoré budú popísané v nasledujúcej časti 6.2.



Obr. 6.1: Definícia RRC stavov pre UE v simulačnom programe NS-3. [25]

6.2 Modifikácia RRC stavov v simulačnom programe NS-3

V nasledujúcej časti budú popísané zmeny vykonané na RRC stavoch. Tieto zmeny, ako bolo zistené v predchádzajúcej časti 6.1, sú potrebné pre správne odpojenie (poprípade pripojenie) UE zariadenia od základovej stanice.

6.2.1 Modifikácia RRC stavov UE zariadenia

Pre správnu funkcionálnosť odpojenia (pripojenia) UE zariadenia od základovej stanice je potrebné aplikovať zmeny v knižnici *lte-ue-rrc.cc*. Zmeny sú potrebné, pretože bez týchto zmien sa UE zariadenie po odpojení od základovej stanice začne znova automaticky pripájať.

Vo Výpise 6.2 sú definované novo pridané metódy pre odpojenie a znova pripojenie UE zariadenia k Enb:

- Metoda *DoDisconnectCustom ()* má za úlohy odpojenie UE zariadenia a zablokovanie jeho automatického znova pripojenia.
- Metoda *AllowReConnect ()* povolí znova pripojenie UE, v kóde potom stačí volať implementovanú metódu *DoConnect ()* pre znova pripojenie UE zariadenia.

Výpis 6.2: Pridanie metód do knižnice RRC stavov pre UE zariadenia v simulačnom programe NS-3.

```
1 // Pridanie vlastnej metódy pre odpojenie UE zariadenia
2 void
3 LteUeRrc::DoDisconnectCustom () {
4     // Zákázanie automatickeho znova pripojenia UE zariadenia
5     m_AllowReConnect = false;
6     // Využitie Implementovanej metódy k odpojeniu UE
7     LeaveConnectedMode();
8 }
9
10 // Povolenie znova pripojenia UE zariadenia k Enb
11 void
12 LteUeRrc::AllowReConnect () {
13     // Umožni znova pripojenia UE zariadenia
14     m_AllowReConnect = true;
15 }
```

Výpis 6.3: Modifikovanie metód pre RRC stavy pre UE zariadenia v simulačnom programe NS-3.

```
1 // Upravenie existujúcej metódy, pre kontrolu nad pripajanim
  UE zariadenia k Enb
2 void
3 LteUeRrc::SwitchToState (State newState)
4 {
5     . . .
6
7     case IDLE_CAMPED_NORMALLY:
8         if (m_connectionPending)
9             {
10                // Pridanie kontrolnej podmienky
11                if (m_stayDisconnected)
12                    {
13                        SwitchToState (IDLE_WAIT_SIB2);
14                    }
15            }
16         break;
17
18     . . .
19 }
20
21 // Upravenie existujúcej metódy, pre kontrolu pri znovu
  pripojení UE zariadenia k Enb
22 void
23 LteUeRrc::DoConnect ()
24 {
25     . . .
26
27     case IDLE_CAMPED_NORMALLY:
28         // Pridanie kontrolnej podmienky
29         if (m_stayDisconnected)
30             {
31                 m_connectionPending = true;
32                 SwitchToState (IDLE_WAIT_SIB2);
33             }
34         break;
35
36     . . .
37 }
```

Vo Výpise 6.3 sú definované modifikácie potrebné pre správne odpojenie a znovu pripojenie UE zariadenia k základovej stanici. Ide o vloženie podmienky do *SwitchToState (State newState)* a *DoConnect ()*. Vloženie podmienky zabezpečí, že nedôjde k automatickému znova pripojeniu UE zariadenia k základovej stanici bez predchádzajúceho povolenia k pripojeniu.

6.2.2 Modifikácia RRC stavov základovej stanice

Pre správnu funkcionálnosť odpojenia UE zariadenia od základovej stanice je okrem konfigurácie RRC stavov pre UE zariadenie (popísané v časti 6.2.1) taktiež potrebné aplikovať zmeny RRC stavov pre základovú stanicu v knižnici *lte-enb-rrc.cc*.

Tieto zmeny sú nevyhnutné, pretože po odpojení UE zariadenia ostávajú v základovej stanici stále alokované zdroje pre toto UE zariadenie. Tým je následne znemožnené pripojenie nových UE zariadení k základovej stanici, najmä v prípade vyčerpania zdrojov základovej stanice dochádza ku chybe, kedy základová stanica už nie je schopná komunikovať s ďalšími UE zariadeniami.

Preto je dôležité nie len samotné odpojenie UE zariadenie od základovej stanice (bližšie popísané v sekcii 6.2.1) ale taktiež aj odpojenie základovej stanice od UE zariadenia. Vo Výpise 6.4 je definovaná novo pridaná metóda, ktorá zabezpečí v prípade požiadavky na odpojenie UE zariadenia správne uvoľnenie alokovaných zdrojov pre toto UE zariadenia zo základovej stanice.

Následne je možné k základovej stanici pripojiť nové UE zariadenia, ktorému je možné alokovať novo uvoľnené zdroje základovej stanice.

Výpis 6.4: Prídanie metódy do knižnice RRC stavov pre základovú stanicu v simulačnom programe NS-3.

```
1 // Rozšírenie základnej metódy RemoveUe
2 void
3 LteEnbRrc::RemoveUeCustom (uint16_t rnti)
4 {
5     NS_LOG_FUNCTION (this << (uint32_t) rnti);
6     std::map <uint16_t, Ptr<UeManager> >::iterator it = m_ueMap
7         .find (rnti);
8     NS_ASSERT_MSG (it != m_ueMap.end (), "request to remove UE
9         info with unknown rnti" << rnti);
10    uint64_t imsi = it->second->GetImsi ();
11    uint16_t srsCi = (*it).second->GetSrsConfigurationIndex ();
12    //cancel pending events
13    it->second->CancelPendingEvents ();
14    // fire trace upon connection release
15    m_connectionReleaseTrace (imsi, ComponentCarrierToCellId (
16        it->second->GetComponentCarrierId ()), rnti);
17    m_ueMap.erase (it);
18    for (uint8_t i = 0; i < m_numberOfComponentCarriers; i++)
19        {
20            m_cmacSapProvider.at (i)->RemoveUe (rnti);
21            m_cphySapProvider.at (i)->RemoveUe (rnti);
22        }
23    if (m_s1SapProvider != 0)
24        {
25            m_s1SapProvider->UeContextRelease (rnti);
26        }
27    m_ccmRrcSapProvider-> RemoveUe (rnti);
28    // need to do this after UeManager has been deleted
29    if (srsCi != 0)
30        {
31            RemoveSrsConfigurationIndex (srsCi);
32        }
33    m_rrcSapUser->RemoveUe (rnti); // Remove UE context at RRC
34    protocol
35 }
```

6.3 Implementácia odpojenia a znovu pripojenia UE zariadenia

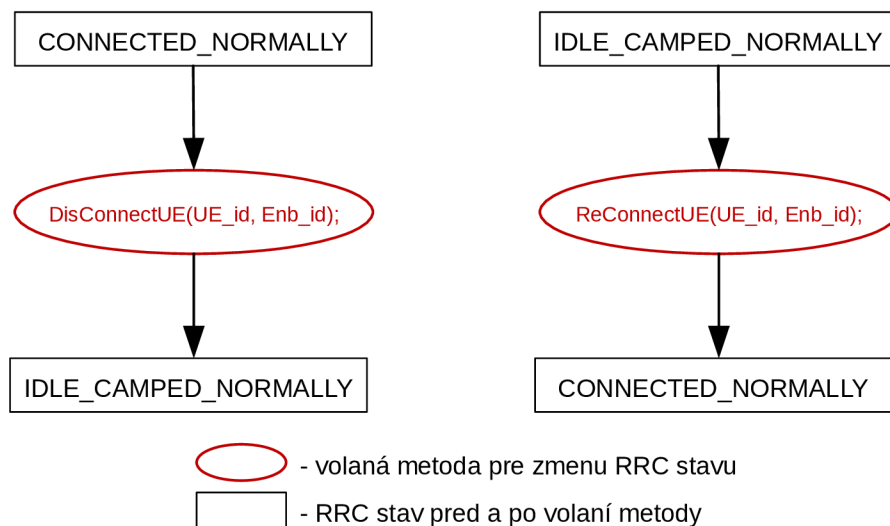
V nasledujúcej sekcii sú využité aplikované zmeny na RRC stavoch pre UE zariadenie (bližšie popísané v sekcii 6.2.1) a základovej stanice (bližšie popísané v sekcii 6.2.2).

Simulačný scenár má základne parametre zhodne so simulačným scenárom, ktorý bol definovaný v kapitole 4. Simulačný scenár je definovaný v súbore *main-simulation.cc*.

Vo Výpise 6.5 je definovaná metóda pre odpojenie UE zariadenia od základovej stanice. Postup odpojenia UE zariadenia pozostáva z odpojenia UE zariadenia od základovej stanice a následne z uvoľnenia alokovaných zdrojov pre UE zariadenia v základovej stanici. Samotne odpojenie UE zariadenia sa vykoná volaním metódy s parametrami, v ktorých je definované vybrané UE zariadenie a základová stanica, na ktorých sa odpojenie aplikuje.

Vo Výpise 6.6 je definovaná metóda pre znovu pripojenie UE zariadenia k základovej stanici. Postup znovu pripojenia pozostáva z povolenia pre znovu pripojenie UE zariadenia a následného pripojenia, kedy sa využije už definovaná metóda *DoConnect()*. Samotne znovu pripojenie UE zariadenia sa vykoná volaním metódy s parametrami, v ktorých je definované vybrané UE zariadenie a základová stanica, na ktorých sa pripojenie aplikuje.

Obr. 6.2 popisuje zmeny RRC stavov UE zariadenia pred a po odpojení (pripojení) k základovej stanici.



Obr. 6.2: Popis RRC stavu pred a po volaní metódy na odpojenie (pripojenie) UE zariadenia.

Výpis 6.5: Definícia metódy pre odpojenie UE zariadenia.

```

1 // Odpojenie UE zariadenia od základovej stanice
2 void DisconnectUE(Ptr<NetDevice> ueDev, Ptr<NetDevice> enbDev
   ) {
3     // note: only 1 eNB in this scenario
4     Ptr<LteUeNetDevice> ueLteDevice = ueDev->GetObject<
       LteUeNetDevice> ();
5     Ptr<LteEnbNetDevice> enbDevice = enbDev->GetObject<
       LteEnbNetDevice>();
6     // get some info
7     uint16_t rnti = ueLteDevice->GetRrc()->GetRnti();
8     uint16_t cellId = ueLteDevice->GetRrc()->GetCellId();
9     NS_LOG_UNCOND("Disconnect_The_UE_rnti_is_ " << rnti << "
       _and_the_cellId_is_ " << cellId);
10    std::cout<<"The_UE_rnti_is_ " << rnti << "_and_the_cellId_
       is_ " << cellId <<"\n";
11
12    uint16_t enb_cellId = enbDevice->GetCellId();
13    std::cout<<"The_ENB_cellId_is_ " << enb_cellId <<"\n";
14
15    // Dis-Connect UE
16    Ptr<LteUeRrc> ueRrc = ueLteDevice->GetRrc();
17    Ptr<LteUeMac> UeMac = ueLteDevice->GetMac();
18    std::cout<<"At_time_ " << Simulator::Now().GetSeconds() <<
       "s_UE_start_to_Disconnect_from_ENB_ " <<"\n";
19
20    ueRrc->DoDisconnect();
21    ueRrc-> DoDisconnectCustom();
22    std::cout<<"The_UE_is_Dis-Connecting_ _rnti_is_ " << rnti
       << "_and_the_cellId_is_ " << cellId <<"\n";
23
24    // Remove UE from the eNB
25    Ptr<LteEnbRrc> enbRrc = enbDevice->GetRrc();
26    Ptr<LteEnbMac> enbMac = enbDevice->GetMac();
27
28    enbMac->GetLteEnbCmacSapProvider()->ReleaseLc(rnti, 1);
29    enbRrc->RemoveUeCustom(rnti);
30 }

```

Výpis 6.6: Definícia metódy pre znovu pripojenie UE zariadenia.

```

1 // Znovu pripojenie UE zariadenia k základovej stanice
2 void ReConnectUE(Ptr<NetDevice> ueDev, Ptr<NetDevice> enbDev)
   {
3     // note: only 1 eNB in this scenario
4     Ptr<LteUeNetDevice> ueLteDevice = ueDev->GetObject<
        LteUeNetDevice> ();
5     Ptr<LteEnbNetDevice> enbDevice = enbDev->GetObject<
        LteEnbNetDevice>();
6     // get some info
7     uint16_t rnti = ueLteDevice->GetRrc()->GetRnti();
8     uint16_t cellId = ueLteDevice->GetRrc()->GetCellId();
9     NS_LOG_UNCOND("Reconnect- The UE rnti is " << rnti << "
        and the cellId is " << cellId);
10    std::cout<<"The UE rnti is " << rnti << " and the cellId
        is " << cellId <<"\n";
11
12    uint16_t enb_cellId = enbDevice->GetCellId();
13    std::cout<<"The ENB cellId is " << enb_cellId <<"\n";
14
15    // Re-Connect UE
16    Ptr<LteUeRrc> ueRrc = ueLteDevice->GetRrc();
17    Ptr<LteUeMac> UeMac = ueLteDevice->GetMac();
18    std::cout<<"At time " << Simulator::Now().GetSeconds() <<
        " s UE start to Re-Connect to ENB " << "\n";
19
20    ueRrc->AllowReConnect();
21    ueRrc->DoConnect();
22    uint16_t NEWrnti = ueLteDevice->GetRrc()->GetRnti();
23    uint16_t NEWcellId = ueLteDevice->GetRrc()->GetCellId();
24    NS_LOG_UNCOND("Reconnect- The UE rnti is " << NEWrnti <<
        " and the cellId is " << NEWcellId);
25    std::cout<<"The UE is Re-Connecting- rnti is " <<
        NEWrnti << " and the cellId is " << NEWcellId << "\n";
26 }

```

Vo Výpise 6.7 je definovaný postup pripájania a odpájania UE zariadení v naplánovanom čase. V prvom kroku je potrebné postupné prvotné pripojenie UE zariadenia, čo zabezpečuje volanie metódy *AttachCustom(UE_id, Enb_id)*. Následne po ukončení vysielať dát nastane odpojenie UE zariadenia pomocou volanie metódy *DisconnectUE(UE_id, Enb_id)*.

V prípade potreby znova vysielať dát sa využije volanie metódy *ReConnectUE(UE_id, Enb_id)*, ktorá zabezpečí znova pripojenie UE zariadenia k základovej stanici, čo následne umožní pokračovanie vo vysielať dát.

Výpis 6.7: Príklad volania metód pre odpojenie a pripojenie UE zariadenia

```

1 // Volanie odpojenia a znova pripojenia UE zariadenia pre 3
  UE zariadenia
2 // Vysiela UE = 1
3 Simulator::Schedule(Seconds(0), &AttachCustom, ueLteDevs.
  Get(0), enbLteDevs.Get(0)); //schedule attach
4
5 // Vysiela UE = 2 , odpoji UE = 1
6 Simulator::Schedule(Seconds(2.2), &DisconnectUE(,
  ueLteDevs.Get(0), enbLteDevs.Get(0));
7 Simulator::Schedule(Seconds(2.3), &AttachCustom, ueLteDevs
  .Get(1), enbLteDevs.Get(0)); //schedule attach
8
9 // Vysiela UE = 3 , odpoji UE = 2
10 Simulator::Schedule(Seconds(5.4), &DisconnectUE(,
  ueLteDevs.Get(1), enbLteDevs.Get(0));
11 Simulator::Schedule(Seconds(5.5), &AttachCustom, ueLteDevs
  .Get(2), enbLteDevs.Get(0)); //schedule attach
12
13 // Znova Vysiela UE = 1 , odpoji UE = 3
14 Simulator::Schedule(Seconds(8.4), &DisconnectUE(,
  ueLteDevs.Get(2), enbLteDevs.Get(0));
15 Simulator::Schedule(Seconds(8.5), &ReConnectUE, ueLteDevs.
  Get(0), enbLteDevs.Get(0));
16
17 // Znova Vysiela UE = 2 , odpoji UE = 1
18 Simulator::Schedule(Seconds(12.4), &DisconnectUE(,
  ueLteDevs.Get(0), enbLteDevs.Get(0));
19 Simulator::Schedule(Seconds(12.5), &ReConnectUE, ueLteDevs
  .Get(1), enbLteDevs.Get(0));

```

6.3.1 Využitie odpojenia a znova pripojenia UE zariadenia

V nasledujúcej časti je popísaný vplyv využitia odpojenia a znova pripojenia UE zariadenia vzhľadom na dosiahnutú priemernú priepustnosť. V Tab. 6.1 sú porovnané dva rôzne varianty On-Off Aplikácie. Tabuľka porovnáva priemernú priepustnosť siete v závislosti od manažovania pripojených UE zariadení.

V prvom prípade sa jedná o simuláciu, kedy nedochádza k manažovaniu pripojených UE zariadení. Všetky UE zariadenia sa hromadne pripoja na začiatku simulácie a všetky UE zariadenia sú pripojené počas celej doby simulácie. V druhom prípade sa jedná o simuláciu, kedy je využité manažovanie pripojených UE zariadení. V tomto prípade sú na začiatku všetky UE zariadenia v RRC stave *IDLE_START*, teda nie sú pripojené k základovej stanici.

Pripojenie UE zariadenie má nastavený presný čas, kedy sa má k základovej stanici pripojiť. Pripojenie UE zariadenia sa uskutočňuje jednu sekundu pre začiatkom vysielania dát. Odpojenie UE zariadenia má taktiež presný čas, kedy sa UE zariadenie od základovej stanice odpojí. Odpojenie UE zariadenia sa uskutočňuje jednu sekundu po ukončení vysielania dát.

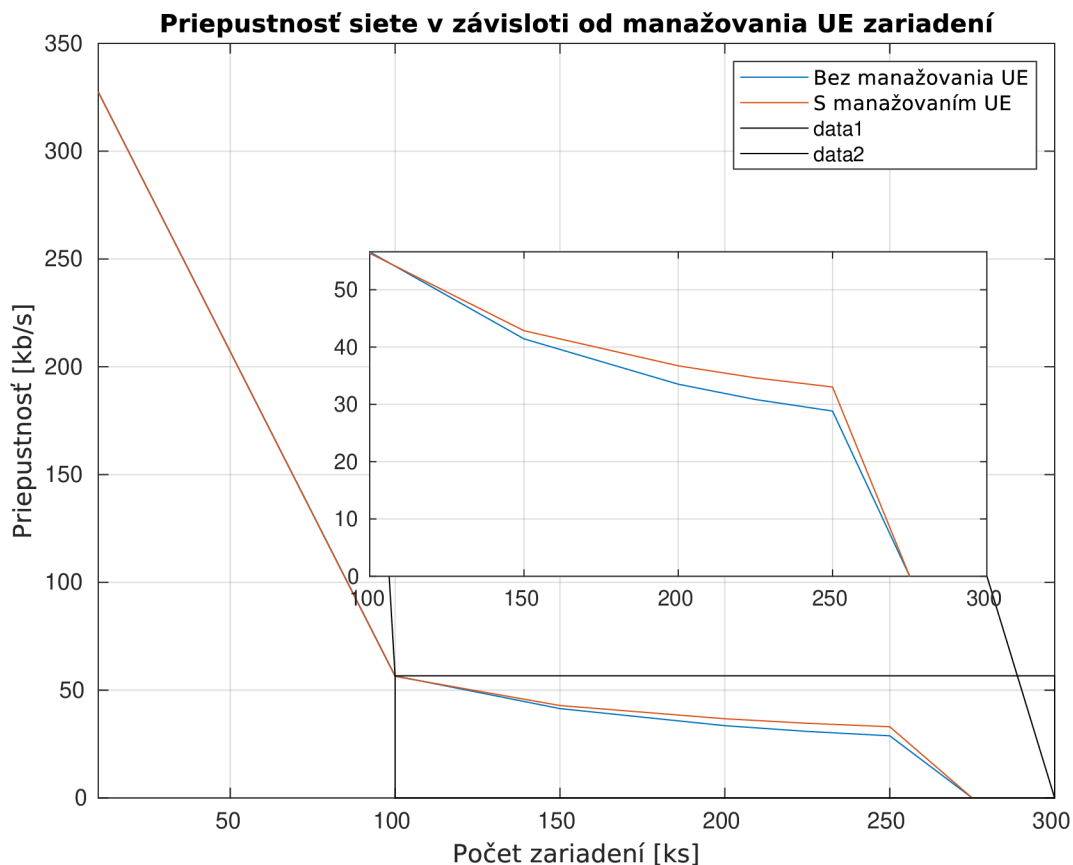
Počet koncových zariadení (UE)	Priemerná Priepustnosť bez využitia manažovania UE zariadení [kb/s]	Priemerná Priepustnosť s využitím manažovania UE zariadení [kb/s]
10	327,53	327,32
100	56,62	56,38
150	41,44	42,86
200	33,52	36,73
225	30,85	34,63
250	28,83	33,03
275	0,00	0,00

Tab. 6.1: Dosiahnutá priemerná priepustnosť v závislosti od manažovania pripojených UE zariadení.

Z Tab. 6.1 vyplýva, že pri správnom manažovaní pripájania a odpájania UE zariadení je možné dosiahnutie lepšej priemernej priepustnosti ako tomu je v prípade, kedy nedochádza k manažovaniu UE zariadení.

Pri počte zariadení v rozsahu od 1 do 150 UE zariadení sa nemá manažovanie UE zariadení veľký vplyv na priemernú priepustnosť. Dosiahnuté priemerné priepustnosti sa do značnej miery zhodujú s priemernými priepustnosťami, kedy nedochádza k manažovaniu UE zariadení.

Manažovanie UE zariadení poskytuje význam pri vyššom počte UE zariadení. Ako vyplýva z Tab. 6.1. Najväčší nárast nastal pri 250 UE zariadení. Kedy vzrástla priemerná priepustnosť z pôvodnej hodnoty 28,83 kb/s na hodnotu 33,03 kb/s, teda priemerná priepustnosť stúpla o 14,57%.



Obr. 6.3: Graf popisujúci priemernú priepustnosť siete v závislosti od manažovanie UE zariadení.

Obr. 6.3 zobrazuje graf, ktorý popisuje priemernú priepustnosť pre simulovaný scenár v závislosti od manažovania UE zariadení. Z grafu na Obr. 6.3 tak vyplýva, že pri manažovaní UE zariadení hlavne pri väčšom počte UE zariadení má správne manažovanie pripojených UE zariadení pozitívny dopad v dosiahnutí vyššej priemernej priepustnosti.

6.4 Simulačný scenár s reálnymi parametrami siete

Jedná sa o simuláciu s využitím manažovania UE zariadení, uskutočňuje sa pripájanie a odpájanie UE zariadenia podľa potrieb UE zariadenia na vysielanie. Simulačný scenár vychádza zo základov simulačného scenára, ktorý bol popísaný v predchádzajúcej časti 6.3. Simulačný scenár je definovaný v súbore *main-simulation-real-param.cc*.

Simulácia je nastavená na dobu trvania simulácie po dobu 3900 sekúnd (cca. 1 hodina). Celkový čas je potom rozdelený na menšie časové úseky, ktoré majú definovanú svoju úlohu:

- V čase od 0.min. do 2.min. - prebieha prvotné nastavenie UE zariadenia.
- V čase od 2.min. do 55.min. - prebieha prvé kolo prenosu dát pre všetky UE zariadenia.
- V čase od 8.min. do 58.min. - prebieha druhé kolo prenosu dát pre vybrané UE zariadenia.
- V čase od 58.min. - prebieha dokončovanie prenosu dát a ukončenie simulácie.

Vo Výpise 6.8 je definovaný postup prvotného pripojenia UE k základovej stanici, udržanie spojenia a následne odpojenie UE zariadenia. Jedná sa o dôležité prvotné nastavenie UE zariadenia. Následne sa využíva manažovanie takto nastavených UE zariadení podľa potrieb UE zariadenia na vysielanie dát.

Výpis 6.8: Prvotné pripojenie a následne odpojenie UE zariadenia.

```
1 // Prvotne Pripojenie UE k Enb, potom Odpojenie
2 double ConnectUE = 0.0;
3 double DisconnectUE = 2.0;
4 for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++) {
5
6     // Pripoj UE k Enb
7     Simulator::Schedule(Seconds(ConnectUE), &AttachMy,
8         ueLteDevs.Get(i), enbLteDevs.Get(0));
9
10    // Odpoj UE od Enb
11    Simulator::Schedule(Seconds(DisconnectUE), &DisconnectUE,
12        ueLteDevs.Get(i), enbLteDevs.Get(0));
13
14    // Odstupnovane Pripojovanie UEs s krokom 0,25 sekundy
15    ConnectUE = ConnectUE + 0.25;
16    DisconnectUE = DisconnectUE + 0.25;}
```

Vo Výpise 6.9 je definovaná prvá aplikácia, ktorá definuje hodnotu Datarate 300 kbps a počet prenesených bytov 2 000. Následne prebieha inštalácia aplikácie v

tomto prípade sa aplikácia inštaluje na všetky UE zariadenia.

Výpis 6.9: Nastavenie prvej aplikácie a následná inštalácia na UE zariadenia.

```
1 uint16_t portVoIP = 5060;
2 OnOffHelper onoff("ns3::UdpSocketFactory", Address(
   InetSocketAddress(remoteHostAddr, portVoIP)));
3 onoff.SetAttribute("DataRate", DataRateValue(DataRate("0.3
   Mbps")));
4 onoff.SetAttribute("MaxBytes", UintegerValue(uint32_t(2000))
   ;
5 onoff.SetAttribute("PacketSize", UintegerValue(500));
6 ApplicationContainer serverApps;
7
8 // Inštalácia App na všetky UE zariadenia
9 for (uint32_t u = 1; u < ueNodes.GetN (); u++) {
10   serverApps.Add(onoff.Install(ueNodes.Get(u)));
11 }
```

Vo Výpise 6.10 je definovaný postup nastavenia prvej aplikácie pre každé UE zariadenia. Každé UE zariadenie má v náhodný čas definovaný začiatok, kedy sa pripojí k základovej stanici. Následne 2 sekundy po pripojení UE zariadenia k základovej stanici začne vysielanie dát, ktoré trvá 3 sekundy. Po ukončení vysielania dát nasleduje odpojenie UE zariadenia od základovej stanici.

Výpis 6.10: Nastavenie vysielania dát pre prvé kolo.

```

1 // Nastavenie Pripojenia UE - Začiatku vysielania - Ukoncenie
  vysielania - Odpojenie UE
2 ApplicationContainer::Iterator i;
3 uint32_t Iterations = 1;
4 double StartApp = 122.0;
5 double StopApp = 125.0;
6 double NextConnectStep = 120.0;
7 for (i = serverApps.Begin(); i != serverApps.End(); ++i) {
8
9 // ReConnect
10 Simulator::Schedule(Seconds(NextConnectStep), &ReConnectUE,
    ueLteDevs.Get(Iterations), enbLteDevs.Get(0));
11 // Štart a Koniec vysielania dát
12 (*i)->SetStartTime(Seconds (StartApp));
13 (*i)->SetStopTime(Seconds (StopApp));
14 // Disconnect
15 Simulator::Schedule(Seconds(NextConnectStep + 10), &
    DisconnectUE, ueLteDevs.Get(Iterations), enbLteDevs.Get(0)
    );
16
17 vysielanie << "Vysielanie UE: " << Iterations << "Zaciatok"
    << NextConnectStep << "Koniec" << (NextConnectStep + 5)
    << std::endl;
18
19 Iterations++;
20 if(Iterations < 75){
21     NextConnectStep = 120.0 + rand() % 1200 + 5; } // od 2 min
    - 20 min
22 if(Iterations >= 75 && Iterations < 125){
23     NextConnectStep = 900.0 + rand() % 1200 + 5; } // od 15 min
    - 35 min
24 if(Iterations >= 125 && Iterations < 205){
25     NextConnectStep = 1500.0 + rand() % 1000 + 5; } // od 25
    min - 42 min
26 if(Iterations >= 205){
27     NextConnectStep = 2200.0 + rand() % 1100 + 5; } // od 36
    min - 55 min
28 StartApp = NextConnectStep + 2.0;
29 StopApp = NextConnectStep + 5.0;
30 }

```

Vo Výpise 6.11 je definovaná druhá aplikácia, ktorá definuje hodnotu Datarate 300 kbps a počet prenesených bytov 3 000. Navýšenie simuluje potrebu na prenos väčšieho objemu dát a taktiež sa ľahšie rozlíši v simulácii od prvej aplikácie. Následne prebieha inštalácia aplikácie v tomto prípade sa aplikácia inštaluje len na vybrané UE zariadenia.

Výpis 6.11: Nastavenie druhej aplikácie a následná inštalácia na UE zariadenia.

```
1 OnOffHelper onoff1("ns3::UdpSocketFactory", Address(
    InetSocketAddress(remoteHostAddr, portVoIP)));
2 onoff1.SetAttribute("DataRate", DataRateValue(DataRate("0.3
    Mbps")));
3 onoff1.SetAttribute("MaxBytes", UintegerValue(uint32_t(3000))
    );
4 onoff1.SetAttribute("PacketSize", UintegerValue(500));
5
6 // List UEs, ktore vysielajú aj v druhom kole
7 // v prvej polke od 208 - 250 - 15 Ues
8 // v druhej polke od 35 - 125 - 25 Ues
9 std::list<int> SecondRoundList = { 224, 214, 208, 213, 234,
    213, 214, 213, 237, 243, 234, 212, 235, 249, 222, 68, 107,
    48, 67, 38, 98, 83, 74, 56, 97, 76, 39, 87, 35, 92, 59,
    68, 44, 112, 93, 122, 87, 118, 96, 103 };
10
11 // Initialize iterator to list
12 std::list<int>::iterator itInstall = SecondRoundList.begin();
13
14 // Naistaluj na Vybrane UEs - 40 UEs vysielá v Druhom Kole
15 ApplicationContainer SecondserverApps;
16 for (uint32_t u = 0; u < SecondRoundList.size(); u++){
17     advance(itInstall, u);
18     SecondserverApps.Add(onoff1.Install(ueNodes.Get(*itInstall))
        );
19 }
```

Vo Výpise 6.12 je definovaný postup nastavenia druhej aplikácie pre vybrané UE zariadenia. Vybrané UE zariadenie má v náhodný čas definovaný začiatok, kedy sa pripojí k základovej stanici. Následne 2 sekundy po pripojení UE zariadenia k základovej stanici začne vysielanie dát, ktoré trvá 3 sekundy. Po ukončení vysielania dát nasleduje odpojenie UE zariadenia od základovej stanici.

Výpis 6.12: Nastavenie vysielania dát pre druhé kolo.

```

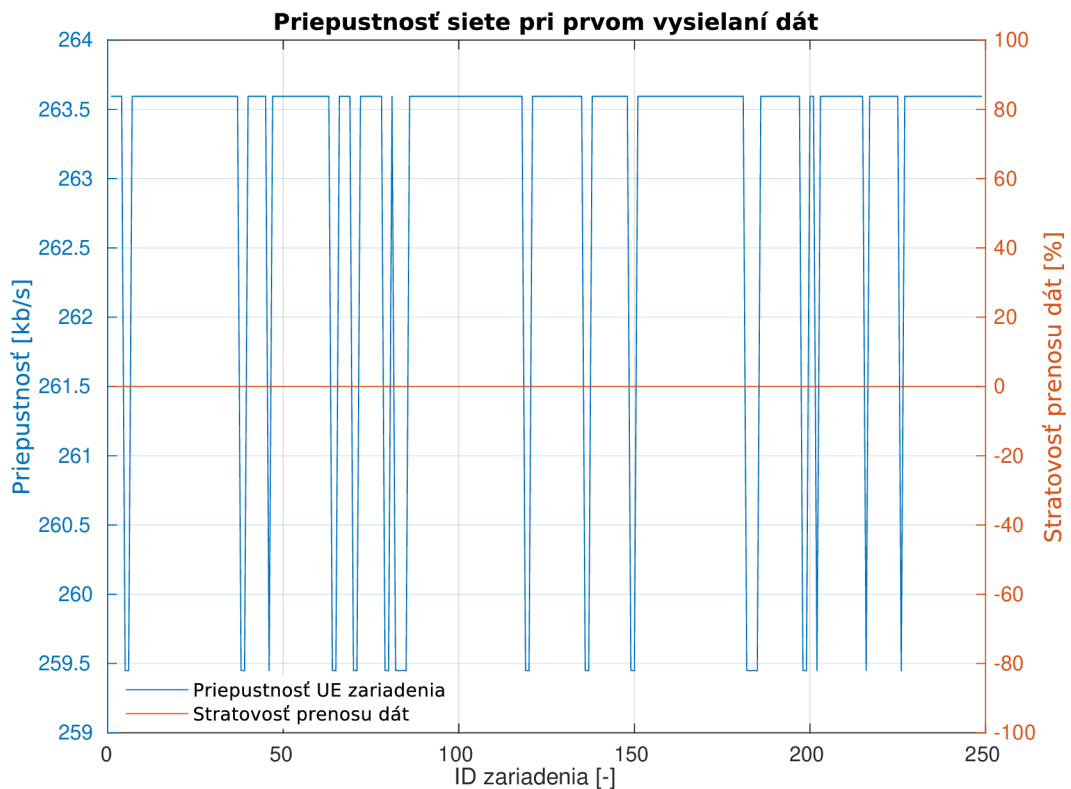
1 // Initialize iterator to list
2 std::list<int>::iterator it = SecondRoundList.begin();
3 ApplicationContainer::Iterator u;
4 uint32_t Iterations1 = 0;
5 double StartApp1 = 482.0;
6 double StopApp1 = 485.0;
7 double NextConnectStep1 = 480.0;
8
9 for (u = SecondserverApps.Begin(); u != SecondserverApps.End
    (); ++u) {
10 advance(it, Iterations1);
11
12 // ReConnect
13 Simulator::Schedule(Seconds(NextConnectStep1), &ReConnectUE,
    ueLteDevs.Get(*it), enbLteDevs.Get(0));
14 // Štart a Koniec vysielania dát
15 (*u)->SetStartTime(Seconds (StartApp1));
16 (*u)->SetStopTime(Seconds (StopApp1));
17 // Disconnect
18 Simulator::Schedule(Seconds((NextConnectStep1 + 10)), &
    DisconnectUE, ueLteDevs.Get(*it), enbLteDevs.Get(0));
19
20 vysielanieSecond << "vysielanie_UE_" << *it << "_zaciatok_"
    << NextConnectStep1 << "_koniec_" << (NextConnectStep1 +
    5) << std::endl;
21
22 Iterations1++;
23 if(*it < 199){
24     NextConnectStep1 = 2300 + rand() % 1200 + 5; } // od 38 min
    - 58 min
25 else{
26     NextConnectStep1 = 480 + rand() % 1400 + 5; } // od 8 min -
    31 min
27
28 StartApp1 = NextConnectStep1 + 2;
29 StopApp1 = NextConnectStep1 + 5;
30 }

```

6.4.1 Vyhodnotenie simulácie s reálnymi parametrami siete

Nasledujúca časť popisuje dosiahnuté výsledky pri nastavení simulačného scenára s reálnymi parametrami siete. Pre správne vyhodnotenie získaných dát zo simulácie bolo potrebné si najskôr overiť aké hodnoty priepustnosti dosiahne jedno UE zariadenie v celom simulačnom scenári pre každú z využitých aplikácií. Výsledkom sú následne získané hodnoty priepustnosti:

- pre 1.aplikáciu - dosiahlo UE zariadenie priepustnosť 263.59 kb/s.
- pre 2.aplikáciu - dosiahlo UE zariadenie priepustnosť 279.36 kb/s.



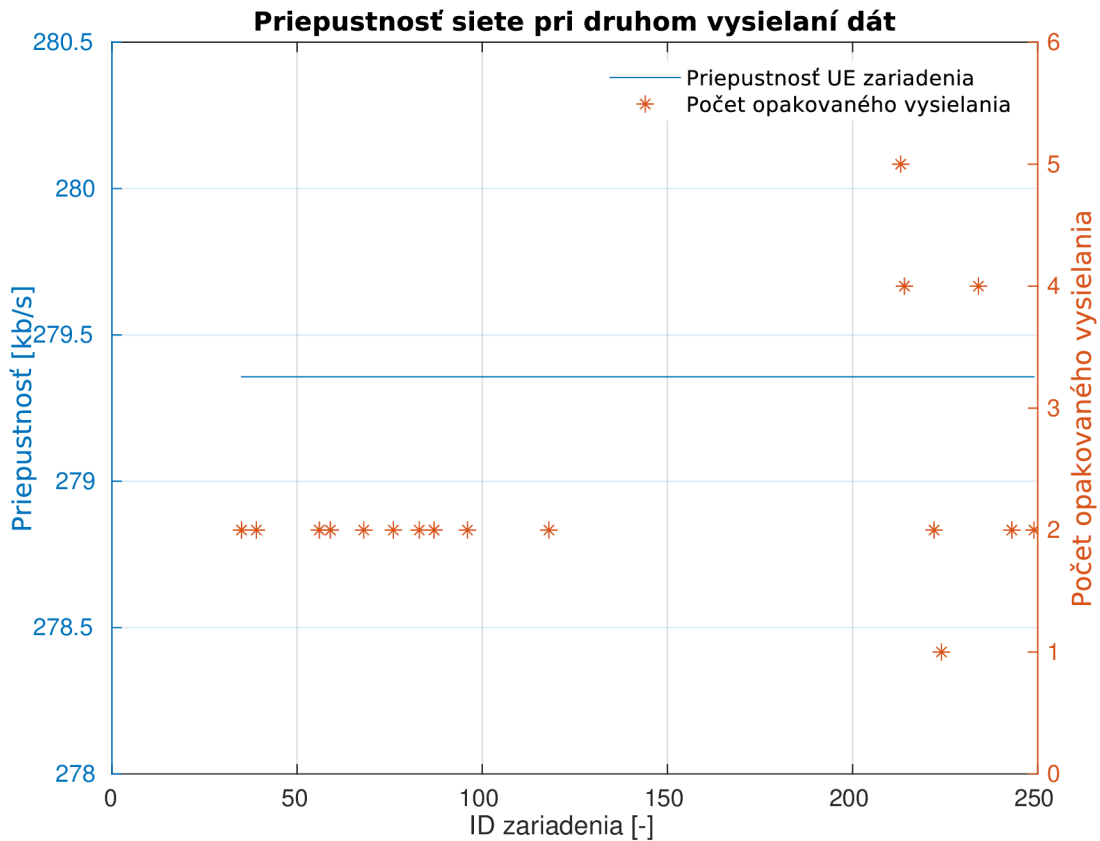
Obr. 6.4: Graf popisujúci dosiahnutú priepustnosť siete pre každé UE zariadenie s využitím prvej aplikácie.

Na Obr. 6.4 je graf, ktorý popisuje dosiahnutú priepustnosť pre každé UE zariadenie s využitím prvej aplikácie. Z grafu zobrazeného na Obr. 6.4 vyplýva, že pri správnom rozvrhnutí vysielania dát je možné dosiahnuť maximálnej priepustnosti. Maximálna hodnota priepustnosti pre prvú aplikáciu bola stanovená na hodnotu 263.59 kb/s.

Z grafu je taktiež vidno, že v prípade stretu vysielania viacerých UE zariadení v rovnaký čas dochádza podľa predpokladu k zníženiu dosahovanej priepustnosti pre

tieto UE zariadenia. Počas celej doby simulácie sa dosiahlo 0% stratovosti paketov ako je vidno na grafe. Dosiahnutej nízkej stratovosti bolo aj vďaka dostatočne veľkej doby vysielania a rozprestreniu vysielania dát v dlhšom časovom rámci.

V prílohe Tab. B.1 sú vypísané získané dáta zo simulácie s využitím prvej aplikácie pre UE zariadenia ID 60 - 88. V tabuľke je definovaný čas začiatku vysielania dát, veľkosť prenášaných dát a stratovosť.



Obr. 6.5: Graf popisujúci dosiahnutú priepustnosť siete pre každé UE zariadenie s využitím druhej aplikácie.

Na Obr. 6.5 je graf, ktorý popisuje dosiahnutú priepustnosť pre vybrané UE zariadenia s využitím druhej aplikácie. Z grafu zobrazeného na Obr. 6.5 vyplýva, že pri druhom vysielaní dát sa vybrané UE zariadenia neprekrývali s inými UE zariadeniami a mohli tak dosiahnuť maximálnej priepustnosti. Maximálna hodnota priepustnosti pre druhú aplikáciu bola stanovená na hodnotu 279,36 kb/s.

Na pravej osi je definovaný počet vysielacích cyklov pre jednotlivé UE zariadenia pre druhú aplikáciu. Z grafu je vidno, že zariadenia s ID 224 vysielala dáta len 1-krát a zariadenia s ID 213 vysielala dáta niekoľko-krát počas druhej aplikácií, konkrétne až 5-krát. V prílohe Tab. B.2 sú vypísané získané dáta zo simulácie s využitím

prvej aplikácie pre UE zariadenia ID 60 - 88. V tabuľke je definovaný čas začiatku vysielania dát, veľkosť prenášaných dát a stratovosť.

Záver

Diplomová práca je zameraná na Low-Power Wide-Area (LPWA) technológiu, ktoré sú svojimi vlastnosťami vhodné pre realizáciu scenárov Internetu vecí (IoT), ktoré nadobúdajú na dôležitosť s masívnym nárastom počtu pripojených zariadení, tzv. massive Machine-Type Communication (mMTC).

V prvej kapitole boli definované a popísané základne pojmy, s ktorými sa môžeme stretnúť pri využívaní LPWA sietí. Bližšie je popísaný internet vecí, Machine-to-Machine (M2M) komunikácia a charakteristika najvyužívanejších technológií, ktoré nachádzajú uplatnenie v LPWA sietí. Jedná sa o technológie využívajúce bez licenčné frekvenčné pásmo sú Sigfox a LoRaWAN a technológie využívajúce licenčné frekvenčné pásmo sú Long Term Evolution for Machines (LTE Cat-M) a Narrowband IoT (NB-IoT), ktoré spadajú pod záštitu 3GPP organizácie. Na konci prvej kapitole je Tab. 1.4, kde sú zhrnuté kľúčové vlastnosti diskutovaných LPWA technológií.

V druhej kapitole je bližšie popísaná LTE Cat-M technológia. Detailne sú charakterizované mechanizmy, ktoré sa v LTE Cat-M technológií využívajú ako napríklad mechanizmus pre zvýšenie pokrytia (v sekcii 2.3.1) alebo mechanizmus pre šetrenie energie zariadenia (v sekcii 2.3.2). Následne je podrobne definovaná a popísaná fyzická vrstva LTE Cat-M technológie. Pri fyzickej vrstve sú popísané komunikačné kanály a signály pre oba smery komunikácie, teda pre Uplink aj pre Downlink. Ku koncu sú popísané Radio Resource Control (RRC) stavy pre LTE Cat-M technológiu, ktoré sú ďalej využívané v praktickej časti pri implementácii LTE Cat-M technológie do simulačného programu Network Simulator 3 (NS-3).

V tretej kapitole je stručne popísaný a definovaný simulačný nástroj NS-3 a jeho oblasť využitia vo vývoji a výskume. Ďalej je popísaný LTE/EPC Network Simulator (LENA) modul, ktorý je v NS-3 implementovaný a je taktiež využitý v praktickej časti práce.

Vo štvrtej kapitole sú definované základné scenáre, ktoré sú simulované v NS-3 simulačnom nástroji. Jedná sa o východiskové simulačné scenáre pre overenie správnosti nastavenia systému a získaniu základného pohľadu na vplyv väčšieho množstva pripojených UE zariadení do siete.

V piatej kapitole sú definované simulačné scenáre, pri ktorých sa realizovali merania k získaniu parametrov siete pri modifikácii základných nastavení simulovanej siete. V sekcii 5.1 je popísaný vplyv počtu pripojených UE zariadení do siete na stratovosť dát. V sekcii 5.2 sú popísané využité aplikácie pre generovanie dát, konkrétne sa jedná o Bulk a On-Off aplikácie. V poslednej sekcii 5.3 je realizovaná modifikácia základných parametrov siete a jej vplyv na parametre typu priepustnosť siete v závislosti od hodnoty nastavenej šírky pásma.

V šiestej kapitole sú bližšie skúmané RRC stavy UE zariadení počas simulá-

cie. V sekcii 6.1 je realizácia implementácie pre výpis RRC stavov UE zariadenia počas simulácie. Hlavné stavy, ktoré sú sledované je pripojený stav (*CONNECTED_NORMALLY*), kedy sa realizuje prenos dát. Ďalším sledovaným RRC stavom je odpojený stav (*IDLE_CAMPED_NORMALLY*), stav kedy neprebíha prenos dát a UE zariadenie nezaberá prostriedky siete. Jedná sa o prostriedky siete, ktoré je možné využiť pre prenos dát od iného UE zariadenia. Potom sú overené funkčnosti implementovaných metód pre odpojenie UE zariadenia od základovej stanice (uviedenie UE zariadenia do stavu, v ktorom neprebíha prenos dát teda v stave *IDLE_CAMPED_NORMALLY*). V sekcii 6.2 sú popísané realizované modifikácie implementovaných RRC stavov v NS-3 aby boli splnené požiadavky podľa LTE Cat-M technológie. V sekcii 6.3 sú implementované zmeny na RRC stavoch a následne realizované simulácie, ktoré overia korektné prepínanie medzi RRC stavom *CONNECTED_NORMALLY*, do ktorého je UE zariadenie prepnuté v čase, keď prebieha prenos dát. A RRC stavom *IDLE_CAMPED_NORMALLY*, do ktorého je UE zariadenie prepnuté v čase, keď neprebíha prenos dát. Ako vyplýva z Obr. 6.3 tak pri správnom nastavení RRC stavov a manažovaniu pripojených UE zariadení je možné docieľiť vyššej priepustnosti. V sekcii 6.4 je realizovaný simulačný scenár definovaný nastaveniami, kedy sú jednotlivým UE zariadeniam pridelené rôzne časy vysielania dát v časom rámci jednej hodiny. Simulačný scenár vychádza z reálneho využitia LTE Cat-M technológie v bežnej prevádzke. Môže sa tak jednať napríklad o scenár s využitím veľkého počtu koncových zariadení, ktoré majú za úlohu napr.: zber fyzických dát zo svojho okolia, komunikovať medzi sebou (využitie v doprave) a iné.

Literatúra

- [1] B. S. Chaudhari and M. Zennaro, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Academic Press, 2020.
- [2] O. Liberg, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergman, and J. Sachs, *Cellular Internet of Things: Technologies, Standards, and Performance*. Academic Press, 2017.
- [3] V. Roblek, M. Meško, and A. Krapež, “A Complex View of Industry 4.0,” *Sage Open*, vol. 6, no. 2, p. 117, 2016.
- [4] Gartner. Gartner Says 5.8 Billion Enterprise and Automotive IoT Endpoints Will Be in Use in 2020. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-08-29-gartner-says-5-8-billion-enterprise-and-automotive-iot>
- [5] P. Sethi and S. R. Sarangi, “Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, 2017.
- [6] LabPlus. (2018) Internet of Things. [Online]. Available: <https://mpython.readthedocs.io/en/master/tutorials/advance/iot/>
- [7] A. Opiah, “The 5G and IoT Revolution,” Apr 2020. [Online]. Available: <https://www.capacitymedia.com/articles/3825285/the-5g-and-iot-revolution>
- [8] A. Wang, “An Overview and the Trends of Wireless Communications for IoT,” Nov 2019. [Online]. Available: <https://medium.com/uniting-digital/an-overview-and-the-trends-of-wireless-communications-for-iot-89e29a36607c>
- [9] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “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)*. IEEE, 2018, pp. 197–202.
- [10] S. Chalapati, “Comparison Of LPWA Technologies And Realizable Use Cases,” 2018. [Online]. Available: <https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2018/2018-comparison-of-lpwa-technologies-and-realizable-use-cases/download>
- [11] A. SIMPLECELL NETWORKS SLOVAKIA, “Sigfox Slovakia,” 2020. [Online]. Available: <https://sigfoxslovakia.com/>
- [12] P. Di Gennaro, D. Lofú, D. Vitanio, P. Tedeschi, and P. Boccadoro, “WaterS: A Sigfox-compliant Prototype for Water Monitoring,” *Internet Technology Letters*, vol. 2, no. 1, p. e74, 2019.

- [13] E. Li and E. Li, “LoRapedia, an Introduction of LoRa and LoRaWAN Technology,” Sep 2020. [Online]. Available: <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/08/03/lorapedia-an-introduction-of-lora-and-lorawan-technology/>
- [14] J. Andacký, “Slovenskí operátori zabrali, siete pre Internet vecí výrazne narástli,” Mar 2020. [Online]. Available: <https://www.trend.sk/trend-archiv/slovenski-operatori-zabrali-siete-pre-internet-veci-vyrazne-narastli>
- [15] P. Ing. Pavel Mašek, “Bezdrátové komunikační technologie: LTE Cat-M1,” 2019.
- [16] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-scale IoT Deployment,” *ICT express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [17] A. Hoglund, J. Bergman, X. Lin, O. Liberg, A. Ratilainen, H. S. Razaghi, T. Tirronen, and E. A. Yavuz, “Overview of 3GPP Release 14 Further Enhanced MTC,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 84–89, 2018.
- [18] 3GPP, “A Global Partnership Releases,” Dec 2020. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/specifications/67-releases>
- [19] G. Association, “Mobile IoT Deployment Map,” Nov 2020. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/deployment-map/>
- [20] GSMA, “LTE-M Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements,” 2019. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2019/08/201906-GSMA-LTE-M-Deployment-Guide-v3.pdf>
- [21] Nsnam, “NSNAM: Documentation,” 2011. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/documentation/>
- [22] H. Zhang and J. Guo, “Application of Manet Routing Protocol in Vehicular Adhoc Network Based on NS3,” in *2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*. IEEE, 2017, pp. 391–394.
- [23] C. T. de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), 2017. [Online]. Available: <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/>
- [24] CTTC, Januar 2014. [Online]. Available: <http://networks.cttc.es/wp-content/uploads/sites/2/2014/01/lena-lte-module-doc.pdf>

- [25] B. Herman, N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena, and J. Ferragut, “Extensions to LTE Mobility Functions for NS-3,” New York, NY, USA, 2014. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/144774259.pdf>
- [26] T. ANTIK, “SmartCity,” 2019. [Online]. Available: <https://smartcityportal.sk/>
- [27] Števo Porubský, “Telekom spúšťa v Petržalke 877 Mbit/s LTE sieť, ďalšie oblasti budú pribúdať,” Nov 2018. [Online]. Available: <https://techbox.dennikn.sk/telekom-spusta-v-petrzalke-877-mbit-s-lte-siet-dalsie-oblasti-budu-pribudat/>
- [28] S. Orange, “Nízkoenergetická LoRa pre internet vecí dostane posilu, Orange „odpilotuje“ LTE-M,” Apr 2019. [Online]. Available: <https://www.orange.sk/orange-slovensko/novinky-tlacove-spravy/clanok/nizkoenergeticka-lora-pre-internet-veci-dostane-posilu-orange-odpilotuje-aj-lte-m>
- [29] S. DSL, “Orange tvrdí že dosiahol 90 percent pokrytie LTE, čo je viac ako Telekom,” Jan 2018. [Online]. Available: <http://www.dsl.sk/article.php?article=20616>
- [30] S. Kagutech, “VMware - čo to je? Popis, inštalácia, aplikácia,” Apr 2021. [Online]. Available: <https://slo.kagutech.com/4231048-vmware-what-is-it-description-installation-application>
- [31] G. Riley, “NetAnim,” Oct 2017. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim>

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

IoT	Internet of Things
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
LPWA	Low-Power Wide-Area
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long-Range Wide-Area Network
3GPP	Third Generation Partnership Project
LTE	Long Term Evolution
NB-IoT	Narrowband IoT
GPS	Global Positioning System
M2M	Machine-to-Machine
MTC	Machine Type Communication
eMTC	enhanced Machine Type Communication
E2E	End-to-End
eNB	eUTRAN Node Base
UE	User Equipment
SC-FDMA	Single-Carrier FDMA
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
QPSK	Quadrature Phase-Shift -keying
eUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Access Network
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
MME	Mobility Managment Entity
SGW	Serving Gateway
PGW	Packet data network Gateway

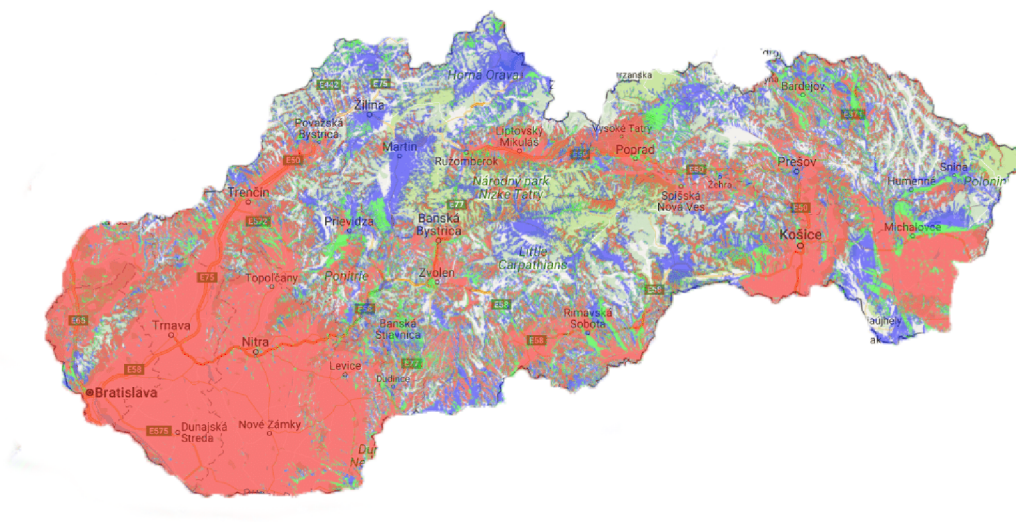
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
MCL	Maximum Coupling Loss
MCS	Modulation Coding Scheme
PSM	Power Saving Mode
DRX	Discontinuous Reception
eDRX	extended Discontinuous Reception
CE	Coverage Enhancement
PSS	Primary Synchronization Signal
SSS	Secondary Synchronization Signal
PBCH	Physical Broadcast Channel
MIB	Master Information Block
RE	Resource Element
PRB	Physical Resource Blocks
NS-3	Network Simulator 3
LENA	LTE/EPC Network Simulator
PRNG	Pseudo-Random Number Generator
CCTC	Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya
QoS	Quality of Service
RLC	Radio Link Control
PDCP	Packet Data Convergence Control
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
RRC	Radio Resource Control
MAC	Medium Access Layer
PHY	Physical Layer
TCP	Transmission Control Protocol

UDP	User Datagram Protocol
FDD	Frequency-Division Duplex
TDD	Time-Division Duplex
SRS	Sounding Reference Signal
CSI	Channel State Information
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identifier
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number

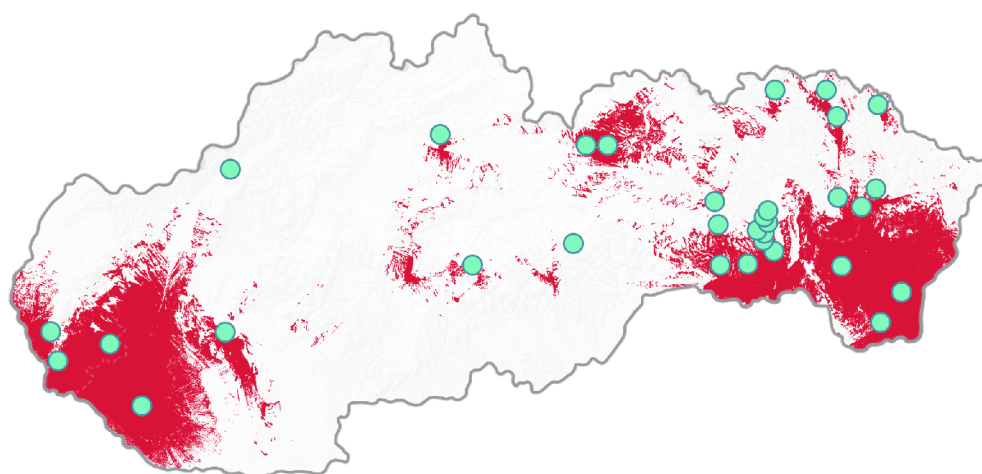
Zoznam príloh

A	Zobrazenie pokrytia technológiou Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT a LTE Cat-M na Slovensku	138
B	Získané dáta zo simulačného scenára s reálnymi parametrami siete	140
C	Obsah priloženého CD	142
D	Využitý software	145
D.1	VMware Workstation PRO	145
D.2	Eclipse	145
D.3	NetAnim	146

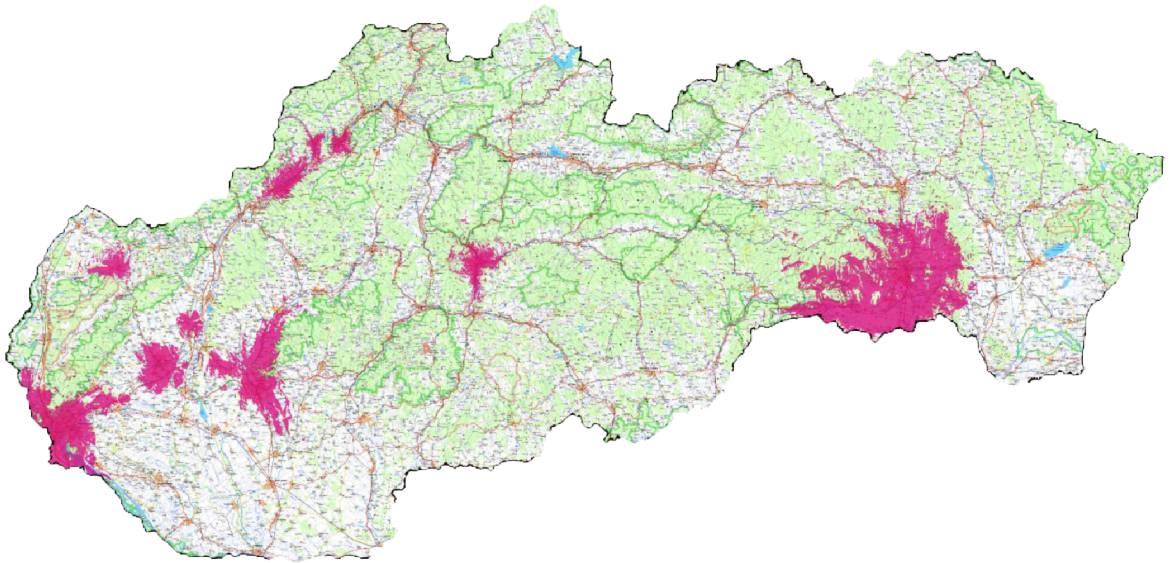
A Zobrazenie pokrytia technológiou Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT a LTE Cat-M na Slovensku



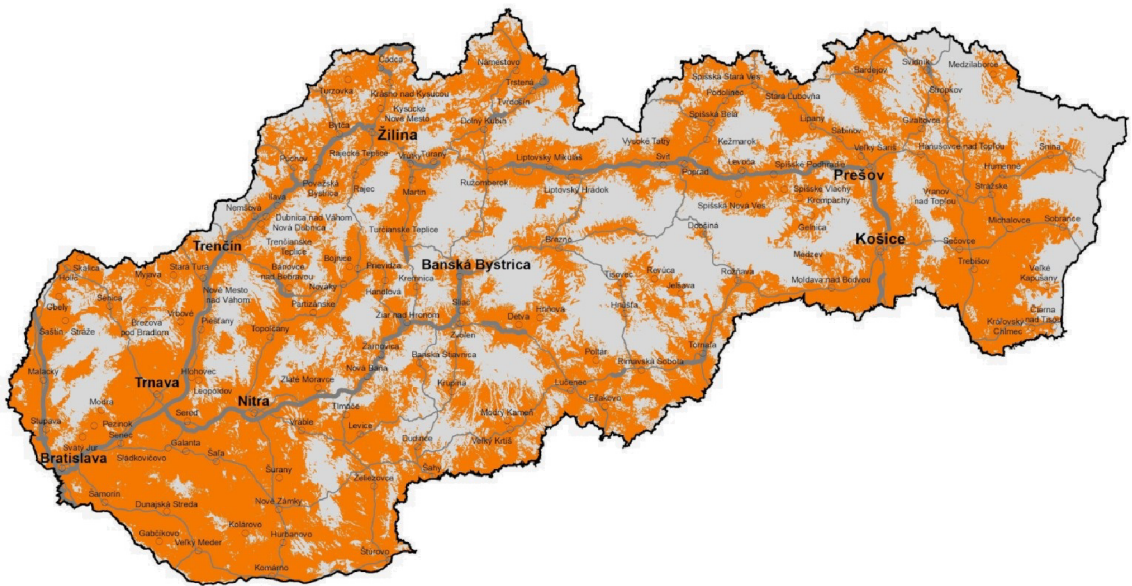
Obr. A.1: Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie Sigfox technológiou od spoločnosti SimpleCell Networks Slovakia. [11]



Obr. A.2: Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie LoRaWAN technológiou od spoločnosti Antik. [26]



Obr. A.3: Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie NB-IoT technológiou od spoločnosti Telekom. [27]



Obr. A.4: Mapa Slovenskej republiky zobrazujúca pokrytie LTE Cat-M technológiou od spoločnosti Orange. [28], [29]

B Získané dáta zo simulačného scenára s reálnymi parametrami siete

ID zariadenia [-]	Začiatok vysielania dát [s]	Priepustnosť [kb/s]	Stratovosť [%]	Veľkosť prenesených dát [bytes]
60	321	263,594	0,00	2000
61	606	263,594	0,00	2000
62	830	263,594	0,00	2000
63	650	263,594	0,00	2000
64	409	259,450	0,00	2000
65	452	259,448	0,00	2000
66	1261	263,594	0,00	2000
67	1030	263,594	0,00	2000
68	171	263,594	0,00	2000
69	254	263,594	0,00	2000
70	1038	259,450	0,00	2000
71	382	259,448	0,00	2000
72	1049	263,594	0,00	2000
73	1220	263,594	0,00	2000
74	1307	263,594	0,00	2000
75	1850	263,594	0,00	2000
76	919	263,594	0,00	2000
77	1472	263,594	0,00	2000
78	1939	263,594	0,00	2000
79	1669	259,450	0,00	2000
80	1748	259,448	0,00	2000
81	1855	263,594	0,00	2000
82	1992	259,450	0,00	2000
83	1313	259,448	0,00	2000
84	1781	259,450	0,00	2000
85	2083	259,448	0,00	2000
86	1093	263,594	0,00	2000
87	1289	263,594	0,00	2000
88	1508	263,594	0,00	2000

Tab. B.1: Získané parametre z vysielania dát pri využití prvej aplikácie ako zdroja pre vysielanie dát.

ID zariadenia [-]	Začiatok vysielania dát [s]	Priepustnosť [kb/s]	Stratovosť [%]	Veľkosť prenesených dát [bytes]
224	480	279,357	0,00	3000
214	895	279,357	0,00	3000
213	1290	279,357	0,00	3000
214	486	279,357	0,00	3000
234	1746	279,357	0,00	3000
68	1215	279,357	0,00	3000
83	2783	279,357	0,00	3000
35	3210	279,357	0,00	3000
87	2425	279,357	0,00	3000
234	3441	279,357	0,00	3000
222	529	279,357	0,00	3000
76	1311	279,357	0,00	3000
118	2827	279,357	0,00	3000
243	2970	279,357	0,00	3000
56	1393	279,357	0,00	3000
96	2921	279,357	0,00	3000
249	2587	279,357	0,00	3000
59	543	279,357	0,00	3000
213	2829	279,357	0,00	3000
39	522	279,357	0,00	3000
213	2767	279,357	0,00	3000
39	1509	279,357	0,00	3000
213	2905	279,357	0,00	3000
59	1521	279,357	0,00	3000
249	3357	279,357	0,00	3000
96	584	279,357	0,00	3000
56	2884	279,357	0,00	3000
243	3455	279,357	0,00	3000
118	1153	279,357	0,00	3000
76	2376	279,357	0,00	3000
222	2878	279,357	0,00	3000
234	816	279,357	0,00	3000
87	966	279,357	0,00	3000
35	2435	279,357	0,00	3000
83	2438	279,357	0,00	3000

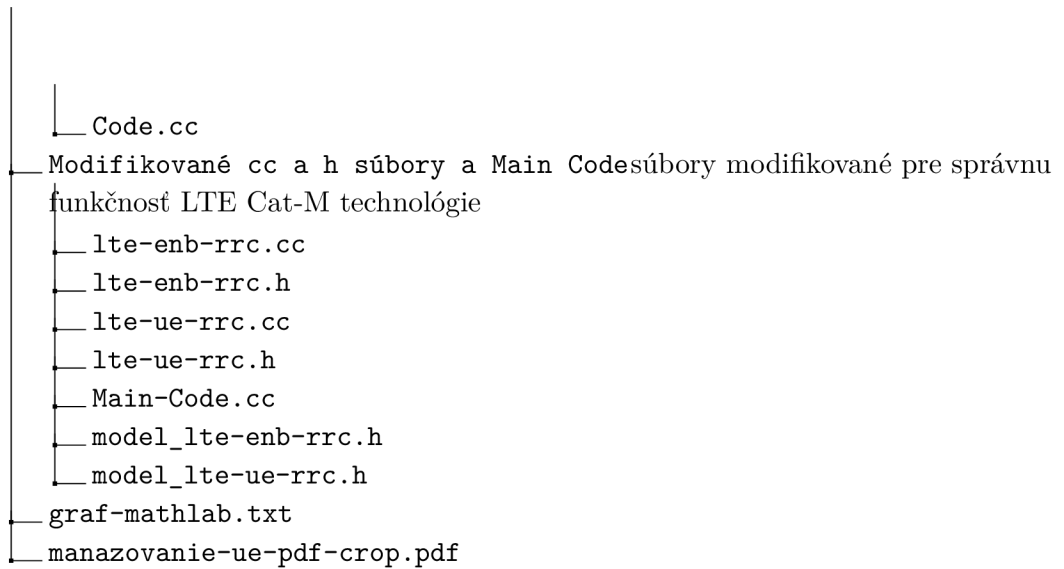
Tab. B.2: Získané parametre z vysielania dát pri využití druhej aplikácie ako zdroja pre vysielanie dát.

C Obsah priloženého CD

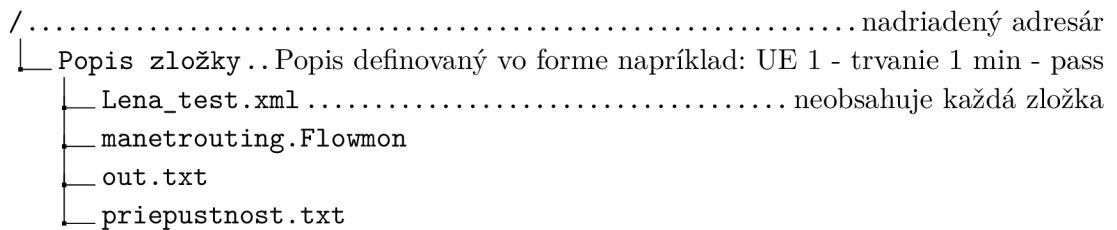
V tejto časti je vyobrazená štruktúra dát uložených na priloženom CD (poprípade v .zip súbore).

```
/ ..... koreňový adresár priloženého CD
├── 1. Meranie Stratovosti.....dáta z merania stratovosti siete
│   ├── zložka s výstupnými dátami simulácie.....štruktúra vyobrazená nižšie
│   ├── Code.cc
│   ├── Graf.xlsx
│   ├── graf-mathlab.txt
│   └── Stratovost-crop.pdf
├── 2. Meranie Priepustnosti.....dáta z merania priepustnosti siete
│   ├── Meranie Bulk - TCP ..... využitie Bulk App a TCP protokolu
│   │   ├── zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
│   │   ├── Code.cc
│   │   ├── Graf.xlsx
│   │   ├── graf-mathlab.txt
│   │   └── Priepustnost-TCP-Bulk-crop.pdf
│   ├── Meranie On-Off - TCP ..... využitie On-Off App a TCP protokolu
│   │   ├── zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
│   │   ├── Code.cc
│   │   ├── Graf.xlsx
│   │   ├── graf-mathlab.txt
│   │   └── TCP-On_Off_App-crop.pdf
│   ├── Meranie On-Off - UDP ..... využitie On-Off App a UDP protokolu
│   │   ├── zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
│   │   ├── Code.cc
│   │   ├── Graf.xlsx
│   │   ├── graf-mathlab.txt
│   │   └── UDP-On_Off_App-crop.pdf
│   ├── Meranie On-Off - UDP Rôzny Start-Time ..... využitie On-Off App a UDP
│   │   │   protokolu rôzny čas začiatku vysielaania dát
│   │   │   ├── zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
│   │   │   ├── Code.cc
│   │   │   ├── Graf.xlsx
│   │   │   ├── graf-mathlab.txt
│   │   │   ├── UDP-porovnani-rovnaky-rozny-cas-crop.pdf
│   │   │   └── UDP-porovnani-rovnaky-rozny-cas-DETAIL-crop.pdf
│   │   ├── Graf.xlsx
│   │   ├── graf-mathlab.txt
│   │   ├── UDP-porovnani-rovnaky-rozny-cas-crop.pdf
│   │   └── UDP-porovnani-rovnaky-rozny-cas-DETAIL-crop.pdf
├── 3. LTE CAT-M.....modifikácia pre LTE Cat-M technológiu
│   └── Default - 5MHz.....overenie default nastavenia šírky pásma
│       ├── zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
│       └── Code_Bandwidth_5_MHz.cc
```

- └─ Code_Default_Bandwidth.cc
- └─ LTE-Cat-M - 1,4MHz.....modifikácia šírky pásma - 1,4 MHz
 - └─ zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
 - └─ Code.cc
 - └─ graf-mathlab-1,4.txt
 - └─ UDP-porovnaní-roznoy-cas-1,4-crop.pdf
- └─ pokles-5MHz-VS-1,4MHz.xlsx
- └─ graf-mathlab-porovnanie.txt
- └─ UDP-porovnaní-rozno-sirka-pasma-crop.pdf
- └─ UDP-porovnaní-rozno-sirka-pasma-DETAIL-crop.pdf
- └─ 4. LTE CAT-M - RRC States...modifikácia RRC stavov pre splnenie podmienok LTE Cat-M technológie
 - └─ 0. Test-disconnect overenie základnej Disconnect funkcionality v NS-3
 - └─ out-bez Disconect.txt
 - └─ out-s-DisConect.txt
 - └─ Popis.txt
 - └─ 1. Overenie dát.....nastavenie vypisovanie RRC stavov jednotlivých UE zariadení
 - └─ zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
 - └─ Code.cc
 - └─ Popis.txt
 - └─ 2. Uvolnenie zdrojov - s Disconnect.....definovanie vlastnej metody pre Disconnect
 - └─ zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
 - └─ Code.cc
 - └─ Popis.txt
 - └─ 3. Uvolnenie zdrojov - nízke SRS = 2 - Disconnect a ReConnectdefinovanie vlastnej metody pre Reconnect a overenie aj s Disconnect
 - └─ zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
 - └─ Code.cc
 - └─ Popis.txt
 - └─ 4. 5 000 UEs ale len 3 sa pripájajú.....test vytvorenia 5000 UEs a pripojenia len 3 z nich
 - └─ zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
 - └─ Code.cc
 - └─ Popis.txt
 - └─ 5. Final Test s Disconnect a Re-Connect pre LTE CAT-M testovanie správnej funkčnosti pre LTE Cat-M technológiu
 - └─ zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie
 - └─ Code.cc
 - └─ graf-pre-250-ues.txt
 - └─ real-scenar-first-round-crop.pdf
 - └─ real-scenar-second-round-crop.pdf
 - └─ 6. Final Test s Realnými Parametrami s Disconnect a Re-Connect pre LTE CAT-M... testovanie LTE Cat-M technológie s realnými parametrami siete
 - └─ zložky s výstupnými dátami simulácie....štruktúra vyobrazená nižšie



Nižšie je vyobrazená štruktúra zložiek v, ktorých sú uložené jednotlivé výstupy zo simulácií (súvisí s hore definovaným odkazom "štruktúra vyobrazená nižšie"). Niektoré zložky s výstupnými dátami môžu obsahovať viacej súborov.



D Využitý software

V nasledujúcej časti budú stručne definované a popísané základne programy, ktoré boli využité pri realizácii diplomovej práce. Pre prácu so simulačným programom NS-3 bolo využito niekoľko programov, ktoré umožnili a uľahčili následnú prácu. Pre beh programu NS-3 bol využitý program VMware Workstation Pro, na ktorom bežal operačný systém Ubuntu. Pre editáciu, ladenie a spúšťanie simulátoru NS-3 bol využitý program Eclipse, v ktorom bolo možné editovať c++ kód a spúšťať simulácie. Pre vizualizáciu niektorých výstupov bol využitý už nainštalovaný program NetAnim.

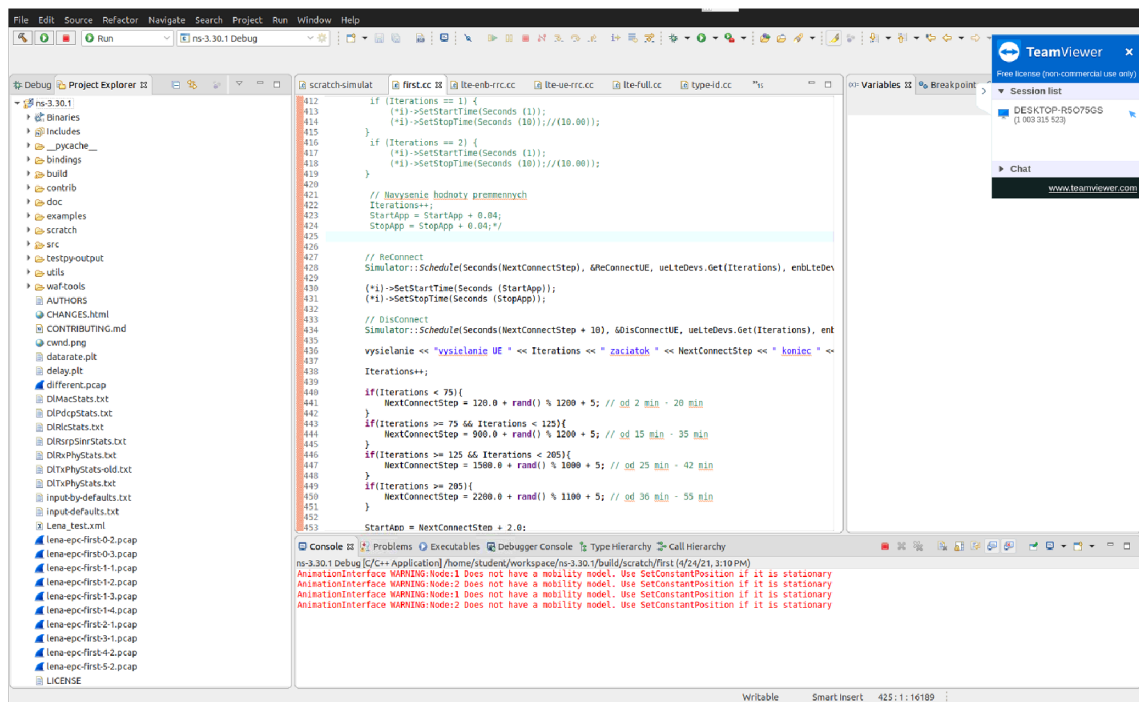
D.1 VMware Workstation PRO

VMware Workstation PRO je program pre virtuálizáciu operačných systémov. Umožňuje tak spustenie virtuálneho stroja (VM) na počítači s iným, poprípade rovnakým operačným systémom. VMware Workstation PRO tak umožní spustenie napríklad už spomínaného OS Ubuntu na operačnom systéme Microsoft Windows alebo Linux.

Využitá PRO verzia VMware programu umožnila napríklad vytváranie Snapshotov. Výhodou Snapshotu je jednoduchá a rýchla obnova do bodu, kedy bol Snapshot vytvorený. Využitie je napríklad v prípade, keď dôjde k určitej nefunkčnosti (poruche) spusteného virtuálneho stroja. Snapshot umožní obnovenie do bodu kedy všetko vo virtuálnom stroji fungovalo správne.

D.2 Eclipse

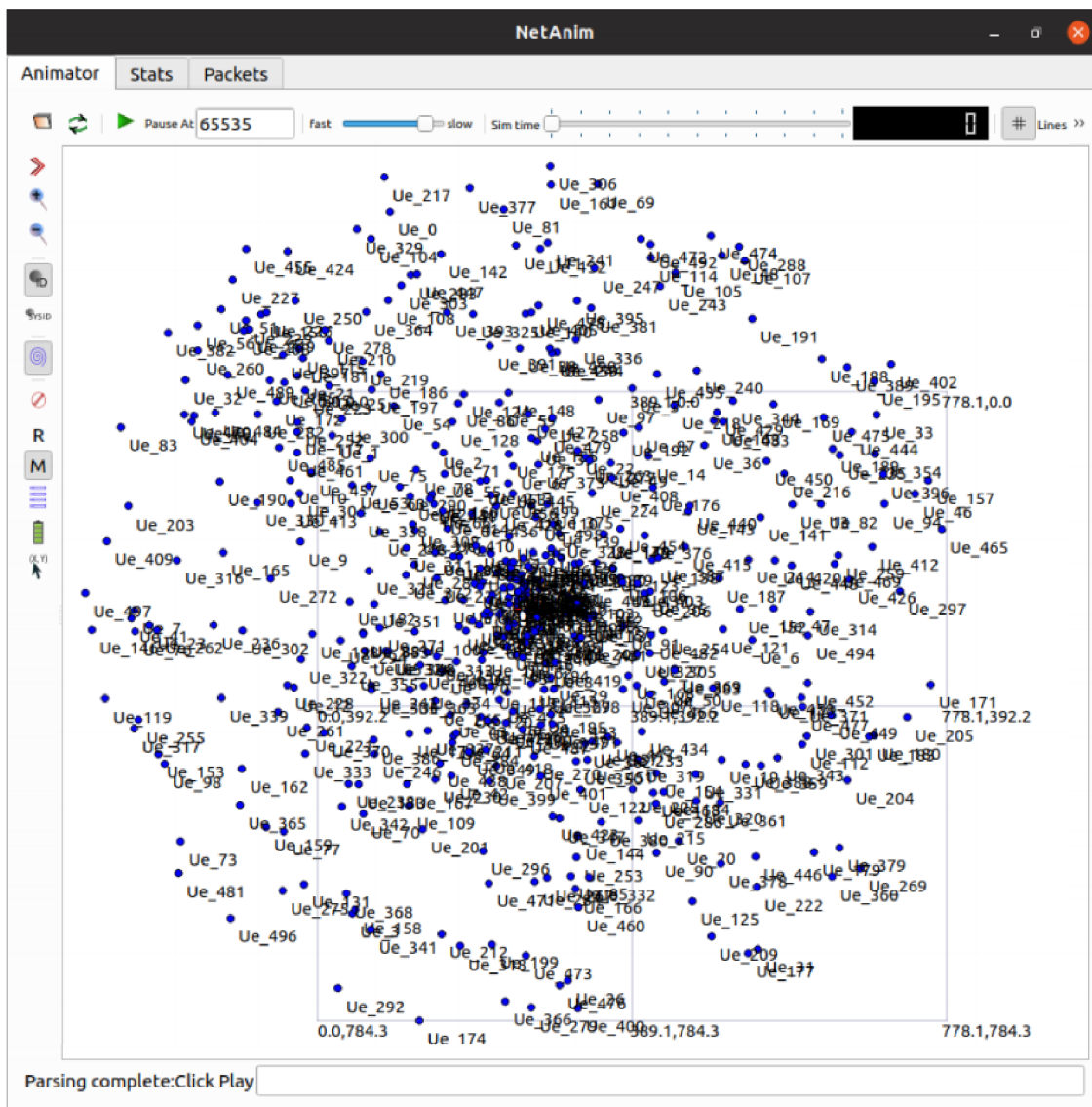
Eclipse je open-source vývojový program, ktorý umožňuje jednoduché a rýchle vytváranie, editovanie (ladenie) a spúšťanie vytvorených projektov. Jeho základ tvorí JAVA IDE. Pre prípad diplomovej práce bolo potrebné do inštalovať CDT toolkit rozšírenie pre podporu programovacieho jazyka c/c++. [30] Na Obr. D.1 je ukážka vývojového programu Eclipse.



Obr. D.1: Ukážka vývojového programu Eclipse.

D.3 NetAnim

NetAnim je program prvotne vytvorený George F. Riley, program pre svoju funkčnosť využíva Qt Toolkit. Program sa využíva spolu s NS-3 programom a umožňuje tak vizuálne reprezentovať dáta získane práve zo simulácií z NS-3 programu. NetAnim vytvára z XML súborov animácie sietí, ktoré boli simulované v NS-3. Výhodou je taktiež možnosť: animácie paketov prechádzajúcich cez linky, krokované vytvorenej simulácie, vykreslenie pozície uzlov a ich cesty medzi sebou. [31] Na Obr. D.2 je ukážka programu NetAnim.



Obr. D.2: Ukážka programu NetAnim.