

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2024

Bc. Viacheslav Tamentsev



# 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 TECHNOLOGIE LTE CAT-M PRO SCÉNÁŘE CHYTRÉHO MĚŘENÍ

IMPLEMENTATION OF THE LTE CAT-M TECHNOLOGY FOR SMART METERING SCENARIOS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Viacheslav Tamentsev**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Pavel Mašek, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Viacheslav Tamentsev

**ID:** 236356

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Implementace technologie LTE Cat-M pro scénáře chytrého měření

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude studium technologie LTE Cat-M. V teoretické části bude provedeno úvodní porovnání dostupných LPWA technologií, kdy bude důraz kladen na detailní rozbor technologie LTE Cat-M a to dle 3GPP Rel. 13+ a to jak z pohledu komunikačních, tak bezpečnostních parametrů. Následně bude provedena implementace pro přenos dat v rámci inteligentních sítí a scénářů chytrého měření. Implementace bude provedena v simulačním nástroji Network Simulator 3 (NS-3). Praktická část se bude sestávat z vytvoření komunikačního scénáře s využitím modulu LENA-NB/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-NB/LENA 5G a to tak, aby upravený modul umožňoval komunikaci dle 3GPP Rel.13 (LTE Cat-M).

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

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

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 21.5.2024

**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

V diplomové práci je zkoumána možnost implementace komunikační technologie Long-Term Evolution for Machine-Type Communications (LTE Cat-M) v Network Simulatoru-3 (NS-3) pro zajištění massive Machine-Type Communications (mMTC). Článek analyzuje možnosti modulů celulární komunikace ve vybraném simulačním nástroji NS-3, včetně modulu LTE/EPC Network Simulator (LENA). V teoretické části jsou diskutovány globální síťové technologie rozlehlých sítí Low-Power Wide Area (LPWA) a jejich aplikace, včetně klíčových aspektů internetu věcí a komunikace Machine-to-Machine (M2M). Zvláštní pozornost je věnována analýze nejběžnějších technologií v sítích LPWA, jako jsou Sigfox, Low-Power Wide Area Network (LoRaWAN), Narrowband Internet of Things (NB-IoT) a Long Term Evolution for Machines (LTE Cat-M).

V praktické části jsou vytvořeny simulační scénáře pro testování a porovnání výkonnosti starších sítí LTE/LTE-A se zaměřením na scénáře mMTC. Výsledkem je konstatování, že sítě 4G nejsou pro tyto scénáře vhodné. Proto je pro realizaci takových scénářů používán modul LTE/EPC Network Simulator Narrowband (LENA-NB) pro modifikace modulu LENA splňující požadavky LTE Cat-M.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Internet věcí, Low Power Wide Area, Sigfox, LoRaWAN, Narrowband IoT, LTE, LTE Cat-M, mMTC, Network Simulator 3, LENA, 5G-LENA, LENA-NB.

## ABSTRACT

The Diploma work examines the feasibility of implementing Long-Term Evolution for Machine-Type Communications (LTE Cat-M) communication technology in Network Simulator-3 (NS-3) to provide massive Machine-Type Communication (mMTC). The paper analyzes the capabilities of cellular communication modules in the selected NS-3 simulation tool, including the LTE/EPC Network Simulator (LENA) module. In the theoretical part, it considers Low-Power Wide Area (LPWA) global networking technologies and their applications, including key aspects of the IoT Internet and Machine-to-Machine (M2M) communications. Special attention is given to analyzing the most common technologies in LPWA networks, such as Sigfox, Low-Power Wide Area Network (LoRaWAN), Narrowband Internet of Things (NB-IoT) and Long Term Evolution for Machines (LTE Cat-M).

In the practical part, simulation scenarios are created to testing and comparing the performance of legacy LTE/LTE-A networks with focus on mMTC scenarios. The result is the determination that 4G networks are not suitable for these scenarios. Therefore, for such scenarios, the LTE/EPC Network Simulator Narrowband (LENA-NB) module is being used for modifications to the LENA module to meet LTE Cat-M requirements.

## KEYWORDS

Internet of Things, Low Power Wide Area, Sigfox, LoRaWAN, Narrowband IoT, LTE, LTE Cat-M, mMTC, Network Simulator 3, LENA, 5G-LENA, LENA-NB.



TAMENTSEV, Viacheslav. *Implementace technologie LTE Cat-M pro scénáře chytrého měření*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedoucí práce: Ing. Pavel Mašek, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Bc. Viacheslav Tamentsev  
**VUT ID autora:** 236356  
**Typ práce:** Diplomová práce  
**Akademický rok:** 2023/24  
**Téma závěrečné práce:** Implementace technologie LTE Cat-M  
pro scénáře chytrého měření

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....  
podpis autora\*

---

\* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

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

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Internet věcí a jeho role v dnešním světě</b>	<b>12</b>
1.1 Úvod do internetu věcí (IoT)	12
1.2 Komunikace strojového typu	12
1.3 3GPP	14
1.4 Současné trendy v oblasti internetu věcí	14
<b>2 Srovnávací analýza technologií výměny dat LPWA</b>	<b>15</b>
2.1 SigFox	15
2.2 LoRaWAN	17
2.3 NB-IoT	18
2.4 LTE-M	18
<b>3 Popis technologie LTE Cat-M</b>	<b>20</b>
3.1 Úvod do LTE Cat-M	20
3.2 Komunikační scénáře	20
3.3 Fyzická vrstva	21
3.4 Blok fyzických zdrojů	21
3.5 Úzkopásmový provoz	22
3.6 Downlink	23
3.7 Uplink	24
3.8 Architektura sítě	24
3.9 Operační módy technologie	25
3.9.1 Režimy snížené spotřeby	26
3.10 Role 3GPP při standardizaci a zdokonalování LTE Cat-M	26
3.10.1 První verze systému LTE-M	26
3.10.2 Verze 15	28
3.10.3 Verze 16	28
3.10.4 Verze 17	29
3.10.5 Verze 18	29
3.10.6 Srovnání posledních verzí LTE-M	30
<b>4 Network Simulator 3</b>	<b>32</b>
4.1 Základní popis	32
4.2 Dostupné moduly pro simulátor	32
4.2.1 LENA	32
4.2.2 5G-LENA	34

4.2.3	LENA-NB(Narrowband)	35
<b>5</b>	<b>Komunikační scénář pro mMTC</b>	<b>36</b>
5.1	Základní komunikační scénář pro mMTC	36
5.2	Rozšířený testovací scénář	39
5.2.1	Stanovení parametrů SRS	40
5.2.2	Implementace kontrolních zpráv	41
5.2.3	Omezení MCS a CQI	43
5.2.4	Implementace PSM a eDRX	44
5.2.5	Uvolnění RRC	47
5.2.6	Úprava parametrů scénáře	49
5.3	Vyhodnocení modelování	49
	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>57</b>
	<b>A Obsah elektronické přílohy</b>	<b>61</b>

# Seznam obrázků

1.1	mMTC, URLLC a požadavky na mobilní širokopásmové připojení. . .	13
2.1	Základní architektura technologie Sigfox. . . . .	16
2.2	Architektura protokolu LoRaWAN. . . . .	17
2.3	Vývoj technologií LTE Cat-M a NB-IoT ve verzi 3GPP. . . . .	18
3.1	Struktura rámce pro LTE a LTE-M. . . . .	22
3.2	Umístění referenčních symbolů v bloku prostředků při přenosu down-link. . . . .	23
3.3	Architektura pro komunikaci typu Machine (NB-IoT a LTE Cat-M). .	25
3.4	Znázornění typů zařízení 4G a 5G. . . . .	30
4.1	Přehled LENA simulačního modelu. . . . .	33
4.2	Přehled tříd od konce ke konci. . . . .	34
5.1	Topologie sítě v programu NetAnim. . . . .	36
5.2	Průměrná rychlost pro tento scénář . . . . .	38
5.3	Topologie sítě pro 40 UE v softwaru NetAnim. . . . .	39
5.4	Propustnost a ztrátovost paketů v závislosti na počtu UE. . . . .	41
5.5	Zpoždění při přenosu dat v kanálu směrem nahoru. . . . .	42
5.6	Definice stavů RRC pro UE v NS-3. . . . .	48
5.7	Ztráta paketů při přenosu dat v kanálu směrem nahoru. . . . .	50
5.8	Zpoždění při přenosu dat v kanálu směrem nahoru. . . . .	51
5.9	Poměr propustnosti ze všech modifikací. . . . .	51

# Seznam tabulek

2.1	Srovnání technických charakteristik sítí LPWA. . . . .	15
3.1	Porovnání specifikací LTE Cat-M1 a LTE Cat-M2. . . . .	27
3.2	Vývoj LTE Cat-M. . . . .	31
5.1	Parametry základního scénáře. . . . .	37
5.2	Specifikace signálů SRS. . . . .	40

# Úvod

Dnešní svět telekomunikací se neustále mění a vyvíjí. V tomto dynamickém prostředí upoutala pozornost výzkumných pracovníků a inženýrů technologie Long-Term Evolution for Machine-Type Communications (LTE Cat-M), která představuje výkonný nástroj umožňující spolehlivou komunikaci v Internet of Things (IoT). Tato technologie je evolucí standardu LTE navrženou speciálně pro podporu rozsáhlých scénářů massive Machine-Type Communications (mMTC), což z ní činí ideálního kandidáta pro scénáře inteligentní analýzy a monitorování.

Tato diplomová práce se zaměřuje na zkoumání a popis technologie LTE Cat-M se zaměřením na verzi Third Generation Partnership Project (3GPP) Rel. 13 (LTE Cat-M1) a její možnou implementaci v prostředí Network Simulator 3 (NS-3) pro scénáře mMTC. V první části práce jsou podrobně popsány trendy a role IoT v dnešním světě. A analyzuje nejběžnější technologie Low-Power Wide-Area (LPWA), včetně LTE Cat-M a Narrowband IoT (NB-IoT) pro licencované spektrum a Sigfox a Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) pro nelicencované.

Dále je provedena podrobnější analýza technologie LTE Cat-M, včetně popisu fyzické vrstvy a kanálů pro připojení. Je analyzována architektura sítě a vlastnosti několika verzí LTE Cat-M, počínaje Rel. 13 a všemi následujícími verzemi.

Práce se poté zaměřuje na simulaci komunikačních scénářů v NS-3 s modulem LTE/EPC Network Simulator (LENA) pro případy mMTC. Určení limitů tohoto modulu a přinesení potřebných úprav z LTE/EPC Network Simulator NarrowBand (LENA-NB) a 5th Generation LTE/EPC Network Simulator (5G-LENA). Nakonec je implementován upravený scénář mMTC kompatibilní s LTE Cat-M pro analýzu chování sítě. Po provedených úpravách je zřejmá nevhodnost sítě 4th Generation (4G) pro scénáře hromadné komunikace zařízení. Tyto úpravy umožňují, aby jedna základnová stanice obsluhovala více než 300 autonomně umístěných zařízení díky Power Saving Mode (PSM) a extended Discontinuous Reception (eDRX).



# 1 Internet věcí a jeho role v dnešním světě

## 1.1 Úvod do internetu věcí (IoT)

V současné době dosáhla počítačová technologie neuvěřitelných rozměrů a masivně se rozšířila po celém světě a ovlivnila lidi i organizace. S rozvojem Internet of Things (IoT) dosáhne celková integrace všech odvětví v oblasti telekomunikací svého vrcholu a umožní propojit prakticky každého s každým [1].

Internet věcí je virtualizace objektů reálného světa za účelem digitálního zpracování a výměny dat mezi zařízeními. Tato technologie má svůj počátek v éře vývoje Radio Frequency IDentification (RFID) v minulém století a pokračuje v globální konsolidaci se zavedením bezdrátových sensorových sítí na konci minulého století. Dnes svět internetu věcí zahrnuje obrovské množství senzorů, čidel, kamer a dalších koncových zařízení. Všechna jsou schopna přenášet data na servery, kde se přijímají rozhodnutí, jako je odeslání alarmu nebo ovládání jiných systémů. Veškerá tato interakce závisí na systémech Machine-to-Machine (M2M), tedy na výměně dat mezi zařízeními bez zásahu člověka [2].

Takové systémy jsou integrovány do aplikací, které se později používají pro sledování vozidel, transakce, inteligentní sítě a moderní zabezpečení lidí. Rozvoj těchto technologií však nutí mobilní operátory řešit problémy s poskytováním služeb těmto systémům, aniž by byla ohrožena kvalita služeb Human-to-Human (H2H). Právě za tímto účelem byly v rámci Third Generation Partnership Project (3GPP) standardizovány technologie Long-Term Evolution for Machine-Type Communications (LTE Cat-M) a další technologie pro inteligentní věci [3].

Vědci a inženýři provádějí výzkum v oblasti internetu věcí jak v akademické a průmyslové oblasti, tak i v podnikatelských a vládních agenturách. Otevírají se nové aplikace a informační a komunikační technologie se integrují do prostředí. Svět internetu věcí bude obrovský.

## 1.2 Komunikace strojového typu

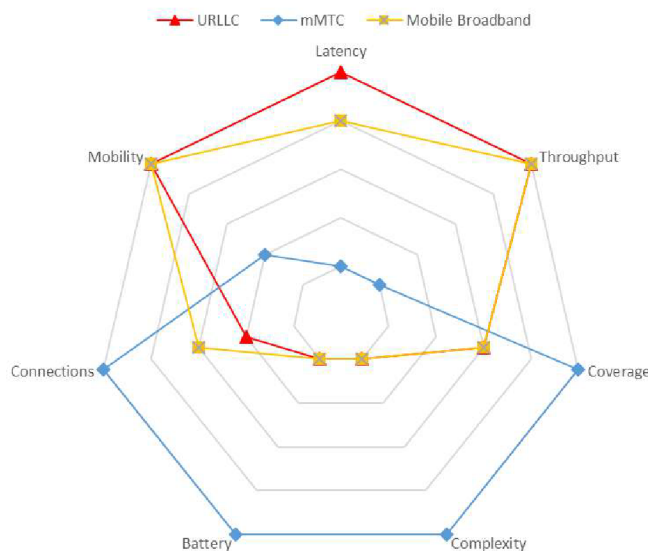
M2M, někdy nazývaná Machine Type Communication (MTC), úzce souvisí s trendem internetu věcí a představuje přímou interakci mezi zařízeními bez zásahu člověka. Tato zařízení mají obvykle omezené napájení a omezené výpočetní zdroje [4].

Zařízení M2M v sítích Low-Power Wide-Area (LPWA), často napájená z baterií (např. teploměry, akcelerometry, snímače pohybu, vlhkosti, kvality vzduchu atd.), mohou být umístěna téměř kdekoli. Proto se požadavky na nízkou spotřebu energie a velký komunikační dosah v řádu jednotek a desítek kilometrů stávají kritickými. Pro splnění těchto potřeb byly vyvinuty technologie LPWA [4].

S rozvojem technologie IoT a nárůstem počtu zařízení se zvyšují nároky na síť a množství přenášených dat. V reakci na tyto potřeby nabývá na významu vývoj a nasazení technologie 5th Generation (5G), která podporuje větší počet zařízení, různé rychlosti přenosu dat a požadavky na kvalitu pro přizpůsobené aplikace IoT [5].

Zvažovaná technologie 5G se neustále vyvíjí. V současné době je možné rozlišit minimálně dvě kategorie s ohledem na požadavky internetu věcí:

- massive Machine-Type Communications (mMTC): Zaměřuje se na poskytování komunikace velkému počtu připojených zařízení. Tato kategorie podporuje různé rychlosti přenosu dat, metody šířky pásma a požadavky na kvalitu vhodné pro rozsáhlé aplikace internetu věcí [3].
- Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC): Zaměřená na poskytování komunikace s vysokou spolehlivostí a minimální latencí. Tato kategorie podporuje požadavky na komunikaci s velmi nízkou latencí, což je rozhodující pro aplikace, kde je vyžadována okamžitá odezva [6].



Obr. 1.1: mMTC, URLLC a požadavky na mobilní širokopásmové připojení [3].

Obrázek 1.1 představuje očekávané požadavky pro kategorie mMTC a URLLC ve formě radarového diagramu. Střed diagramu představuje zmírněné požadavky na síť, zatímco okrajové části odrážejí přísné požadavky [3].

## 1.3 3GPP

3GPP je globální standardizační fórum, které vyvíjí a podporuje mobilní komunikační systémy, jako jsou Global System for Mobile Communication (GSM), Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) a Long Term Evolution (LTE). 3GPP bylo založeno v roce 1998 a koordinuje vývoj a podporu těchto systémů, přičemž v roce 2017 dosáhlo již 15. vydání. Vyvíjí také standardy pro 5G. 3GPP pracuje v cyklech vydávání verzí a poskytuje funkce pokrývající GSM, UMTS a LTE. Každé vydání obsahuje pracovní položky, které zajišťují funkčnost v různých fázích vývoje, od požadavků až po testovací postupy. Organizační struktura zahrnuje skupiny pro technické specifikace (TSG), které podporují různé aspekty technologie [3].

Projekt 3GPP je koordinován sedmi regionálními normalizačními organizacemi a zahrnuje několik skupin Technical Specification Groups (TSG), například Service and System Aspects (SA), Core Network and Terminals (CT), GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN) a Radio Access Network (RAN). Každá z těchto skupin pokrývá různé aspekty technologie a jejich práce probíhá prostřednictvím cyklů vydávání verzí, z nichž každá obsahuje různé pracovní položky, které zajišťují nové funkce a rozvoj technologie [3].

Důležitou roli v projektu hraje Project Co-ordination Group (PCG), která řídí celkový proces a přijímá klíčová rozhodnutí. 3GPP také spolupracuje se sedmi organizačními partnery (OP), kteří zastupují různé regiony světa a zajišťují škálovatelnost projektových činností. Organizační struktura 3GPP zajišťuje, že různé skupiny a odborníci z různých společností spolupracují na zajištění úspěšné standardizace a vývoje mobilních technologií [3].

## 1.4 Současné trendy v oblasti internetu věcí

Jak již bylo popsáno dříve, nové systémy jsou integrovány do aplikací včetně zabezpečení domácností. Různé senzory a kamery Iot pro inteligentní domácnost se každoročně aktualizují a popularizují ve společnosti. Taková řešení budou mít zejména v rodinách s nízkými příjmy obrovský význam, protože je lze použít k monitorování a ovládání různých součástí domácnosti. Uplatnění najde v různých oblastech včetně přenosu elektřiny ke spotřebitelům a sledování účtů za komunální služby. Uživatelům umožňuje hospodárně a efektivně řídit spotřebu elektřiny [7].

Pro tuto kategorii lidí je nejdůležitější, že pokud se do těchto aplikací zapojí sítě Low Power Wide Area Networks (LPWAN), mohou se náklady na služby potenciálně ještě snížit. Technologie LPWAN, jako jsou LoRaWAN, Sigfox, Narrow Band Internet of Things (NB-IoT), Long Term Evolution for Machine (LTE Cat-M), představují nejpřespektivnější bezdrátový přístup k rozsáhlým sítím (WAN).

## 2 Srovnávací analýza technologií výměny dat LPWA

Protože jedním z hlavních problémů internetu věcí je přenos informací v podmínkách omezené životnosti baterie. Proto je vhodné uvažovat o protokolech pro výměnu dat v sítích LPWA, jako jsou LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE Cat-M. Tabulka 2.1 ukazuje charakteristiky těchto protokolů.

Tab. 2.1: Srovnání technických charakteristik sítí LPWA [8], [9].

Technické specifikace	SigFox	NB-IoT	LoRaWAN	LTE Cat-M
Rozsah licencí	Nelicencovaný	Licencovaný	Nelicencovaný	Licencovaný
Přenosová rychlost	100 bitů/s	1-200 kbps	0,3-50 kbps	1 Mb/s
Bezpečnost	Nízká (AES-128)	Velmi vysoká (zabezpečení LTE)	Střední (AES-128)	Velmi vysoká (zabezpečení LTE)
Pokrytí (MCL)	162 dB	164 dB	157 dB	155 dB
Životnost baterie, rok	10 (Při spotřebě < 2 uA)	10 (Při spotřebě < 2 uA)	8 (Při spotřebě < 3 uA)	10 (Při spotřebě < 8 uA)

Jak je patrné z tabulky, v sítích LPWA se používají licencovaná i nelicencovaná frekvenční pásma, která poskytují různé specifikace a možnosti pro aplikace IoT. Licencované spektrum je kontrolováno mobilními operátory a zahrnuje specifické frekvence chráněné vládními licencemi. Mezi výhody patří stabilní připojení a možnost přenášet data na velké vzdálenosti [8].

Veřejně dostupné spektrum nevyžaduje licence a lze ho volně používat. V kontextu LPWA fungují technologie jako LoRaWAN a Sigfox v nelicencovaných pásmech, jako je 433 MHz v Evropě. Nelicencované frekvence však podléhají vyšší pravděpodobnosti rušení od jiných zařízení využívajících stejné spektrum a mohou mít omezenou šířku pásma [8].

Volba mezi licencovanými a nelicencovanými pásmy závisí na požadavcích na dosah přenosu, šířce pásma, stabilitě spojení a geografických faktorech.

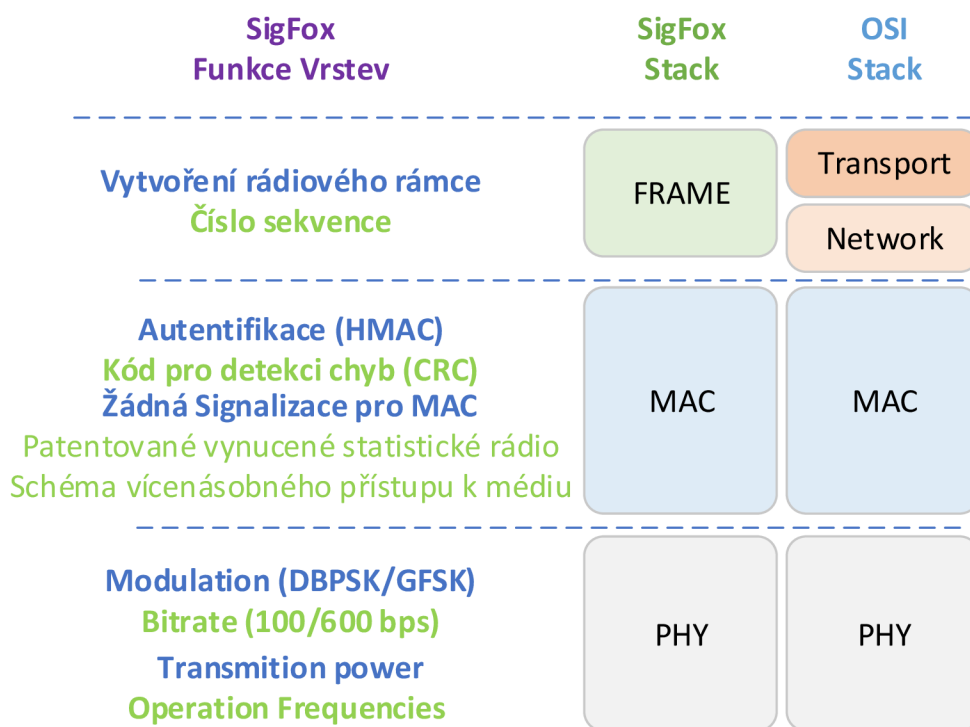
### 2.1 SigFox

SigFox je komunikační technologie s nízkou spotřebou energie, která umožňuje komunikaci na velké vzdálenosti, zejména v městském prostředí (až 10 km). Probíhá prostřednictvím úzkého pásma frekvencí, které zajišťuje připojení zařízení k síti. Výměna dat probíhá v nelicencovaném frekvenčním pásmu (868,8 MHz) s využitím šifrování Advanced Encryption Standard (AES) a Hash-based Message Authentication

Code (HMAC). Technologie je však omezena použitím licencovaných snímačů, maximální délkou zprávy (12 bajtů) a limitem počtu zpráv v síti (140 za den). Omezeny jsou také technické zprávy pro sestupný přenos (4 za den), což omezuje možnost dálkové konfigurace zařízení [8].

Sigfox využívá bezlicenční frekvenční pásmo 868 MHz pro Evropu, 915 MHz pro Severní Ameriku a 433 MHz pro Asii. Zprávy jsou přenášeny pomocí technologie Ultra-Narrow Band (UNB), která využívá Differential Binary Phase-Shift Keying (DBPSK) pro uplink a Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) pro downlink. Sigfox pracuje v poloduplexním režimu a poskytuje latenci od 1 do 30 sekund [9].

Teoretická životnost napájení zařízení Sigfox dosahuje více než 10 let. Maximální přípustný výkon je stanoven na 14 dBm. Velikost zprávy se liší v závislosti na směru komunikace a činí 12 bajtů pro Uplink a maximálně 8 bajtů pro Downlink. Omezení počtu zpráv přenesených za den je 140 a je určeno omezením pracovního cyklu (1% pro Uplink, 10% pro Downlink). Dosah zařízení se pohybuje od 3 až 5 kilometrů v městských oblastech do 50 kilometrů v otevřeném terénu. Na obrázku 2.1 je typická architektura uzla SigFox [8].



Obr. 2.1: Základní architektura technologie Sigfox [10].

Zvláštností zařízení Sigfox je, že nepotřebují kartu Universal Subscriber Identity

Module (SIM) ani přidělenou IP adresu. Majitel identifikuje zařízení pomocí ID zařízení a autorizačního kódu pro přenos Porting Authorisation Code (PAC), který lze změnit online [10].

## 2.2 LoRaWAN

LoRaWAN je protokol pro síť LPWA určený k výměně malého množství informací (až 254 bajtů) při nízkých rychlostech přenosu dat (0,3 až 50 kb/s). Tato rovnováha mezi dosahem a rychlostí zajišťuje nepřetržité využívání energie senzory. Technologie využívá kódování dat pomocí širokopásmových impulsů a lineárně-frekvenční modulace, díky čemuž je stabilní vůči frekvenčním odchylkám a umožňuje použití cenově dostupných křemenných rezonátorů [8].

Sítě LoRaWAN využívají bezlicenční frekvenční pásma, v Evropě se používají pásma 683-870 MHz a 433 MHz. Síť LoRaWAN je uspořádána do hvězdicové topologie, kde jsou koncová zařízení připojena k centrálnímu serveru prostřednictvím bran (základnových stanic). Topologie podporuje koncová zařízení s voláním iniciovaným zařízením a režimem přenosu dat zaměřeným na síť [8].

Technologie LoRaWAN zahrnuje schéma Adaptive Data Rate (ADR), kdy síťový server vybírá kanály a přenosovou rychlost pro každý uzel. Systém rovněž poskytuje dvouúrovňové šifrování dat (AES-128) a jedinečné klíče pro ochranu přenášených dat koncovými zařízeními. Dosah pokrytí v městském prostředí je až 5 kilometrů a senzory mohou fungovat na baterie více než 10 let [11].

Na obrázku 2.2 je typická architektura systému uzlu LoRaWAN.



Obr. 2.2: Architektura protokolu LoRaWAN [11].

LoRaWAN klasifikuje koncová zařízení do tří tříd: třída A (základní), třída B (další přijímací sloty) a třída C (trvale otevřené přijímací sloty). Každá třída poskytuje různé úrovně spotřeby energie a latence při komunikaci se serverem [12].

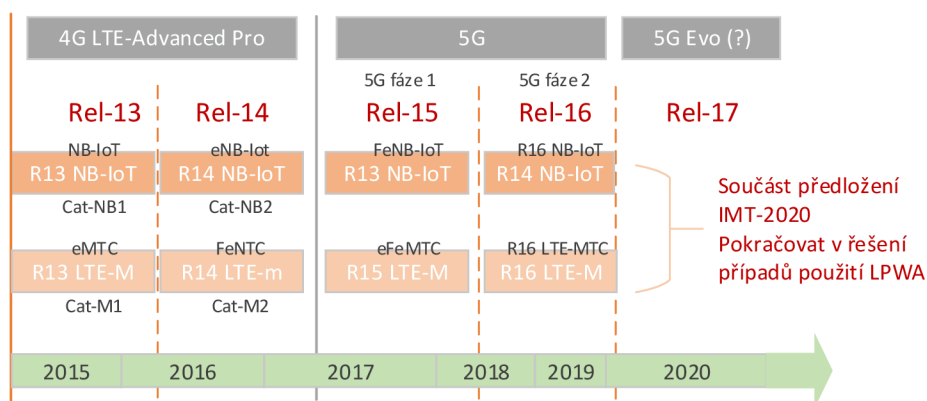
## 2.3 NB-IoT

Technologie NB-IoT představuje integraci mobilních uživatelských dat a zařízení internetu věcí, která poskytuje pokrytí celého města a rychlost přenosu dat až 200 kb/s. Využívá jak současnou infrastrukturu sítě 4G (Rel. 10+), tak má nízkou spotřebu energie vysílače, což zaručuje dlouhou životnost zařízení až 10 let. Ve střední Evropě zahrnuje hlavní pásmo B20 (800 MHz) s možným využitím B3 (1800 MHz) a B8 (900 MHz) [8].

NB-IoT používá pro přenos dat různé modulace, včetně Frequency Division Multiple Access (FDMA) pro vzestupný kanál a Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) pro sestupný kanál. Technologie poskytuje možnost poloduplexního přenosu s latencí v rozmezí 1,6 až 10 sekund [9]. Má však některé nevýhody, jako jsou náklady na aktualizace softwaru buňky a využívání licencovaného spektra. Zařízení NB-IoT také ke svému provozu vyžadují kartu SIM [11].

## 2.4 LTE-M

Technologie LTE-M, kterou představila organizace 3GPP spolu s protokolem eMTC (rozšířený typ komunikace mezi stroji), zahrnuje široké frekvenční pásmo až do 1,4 MHz a podporuje hlasové zprávy.



Obr. 2.3: Vývoj technologií LTE Cat-M a NB-IoT ve verzi 3GPP [13].

Je navržena tak, aby splňovala požadavky internetu věcí, a dosahuje rovnováhy mezi rychlostí přenosu dat (až 1 Mb/s) a efektivní spotřebou energie. Technologie byla představena jako odnož standardu LTE, který je zbaven redundantních technologií, aby poskytoval připojeným zařízením delší výdrž baterie [14].

Na rozdíl od jiných protokolů je LTE-M zaměřen na aplikace internetu věcí s vysokými nároky na datový provoz a zároveň poskytuje nízkou spotřebu energie a možnost přenosu dat na velké vzdálenosti. Technologie využívá schémata přenosu dat podobná LTE, tedy OFDMA pro příchozí spojení a Single-Carrier FDMA (SC-FDMA) pro odchozí spojení, což jim umožňuje koexistovat ve stejné buňce LTE. Jednou z výhod LTE Cat-M je možnost podporovat v případě potřeby přenos hlasu přes Voice over LTE (VoLTE) [9].



## 3 Popis technologie LTE Cat-M

### 3.1 Úvod do LTE Cat-M

LTE Cat-M - Jedná se o nízkopříkonovou mobilní komunikační technologii. Tento standard byl vyvinut speciálně pro lepší podporu MTC a internetu věcí. V této verzi byly vyvinuty režimy zařízení kategorie M1 (Cat-M1) a rozšířeného pokrytí (CE) jako součást studie 3GPP o poskytování nízkonákladových zařízení pro komunikaci typu Machine-Type (MTC User Equipment) [14].

Od té doby byla dokončena řada souvisejících prací 3GPP [3]:

- verze 12 «Nízké náklady a zvýšené pokrytí MTC UE pro LTE», která zavedla zařízení Cat-0.
- verze 13 «Další vylepšení fyzické vrstvy LTE pro MTC», která zavedla zařízení Cat-M1.
- verze 14 «Další vylepšení fyzické vrstvy LTE pro MTC», které zavedlo zařízení Cat-M2 a různá další vylepšení.

### 3.2 Komunikační scénáře

Sítě LTE Cat-M poskytují řadu komunikačních scénářů určených speciálně pro IoT. Následují hlavní komunikační scénáře:

1. massive Machine Type Communication: Tento scénář je určen pro obsluhu rozsáhlých sítí zařízení internetu věcí, kde je kladen důraz na efektivní využití energie a síťových zdrojů. Hlavním úkolem je zajistit podporu velkého počtu zařízení, i když se sítě komunikují jen zřídka. Tento přístup je ideální pro aplikace, kde přenos dat neprobíhá nepřetržitě, ale provádí se periodicky za účelem aktualizace stavu zařízení nebo zasílání zpráv o událostech. Klíčovým aspektem je minimalizace spotřeby energie zařízení, která je rozhodující pro zajištění dlouhé životnosti baterií v zařízeních internetu věcí [3].
2. Critical Machine Type Communication (cMTC): Tento scénář je zaměřen na aplikace, kde je vyžadována vysoká spolehlivost a okamžitá komunikace mezi zařízeními a sítí. Jedinou vlastností cMTC je schopnost zajistit rychlý přenos dat s minimální latencí. Technologie cMTC se používá v kritických scénářích, jako je řízení bezpečnosti a reakce na mimořádné události, kde i sebemenší zpoždění v datové komunikaci může mít vážné následky [15].
3. Poskytování geolokace (lokalizační služby LTE Cat-M): Scénář poskytuje možnost lokalizovat zařízení pomocí vestavěných geolokačních zařízení v síti LTE Cat-M. Používá se v aplikacích, kde je vyžadována přesná lokalizace zařízení

IoT, jako je sledování majetku, řízení dopravy a další služby závislé na poloze. Tento scénář podporuje řadu aplikací založených na určování polohy a poskytuje přesnost a spolehlivost v různých případech použití [16].

Každý z těchto komunikačních scénářů LTE-M je přizpůsoben jedinečným požadavkům a vlastnostem zařízení IoT a poskytuje flexibilitu a efektivitu pro různé aplikace IoT.

### 3.3 Fyzická vrstva

LTE Cat-M rozšiřuje fyzickou vrstvu LTE zavedením vylepšení pro účinnou podporu MTC. Základní přenosová schémata (DL a UL) zahrnují ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením v DL a (SC-FDMA v UL, což umožňuje kompatibilitu s LTE). Tyto změny umožňují koexistenci LTE Cat-M s konvenčními přenosy LTE ve stejné buňce na stejné nosné a dynamické rozdělování zdrojů mezi uživatele LTE Cat-M a konvenční LTE. Návrh fyzické vrstvy zohledňuje nové aspekty, které zajišťují optimální výkon pro zařízení internetu věcí [3].

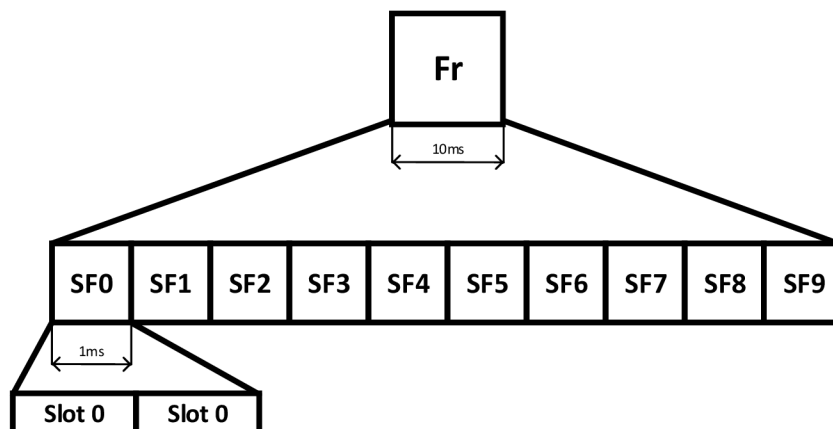
Struktura rámce LTE závisí na režimu duplexu [3]:

1. Frequency Division Duplex (FDD): Rámce UL i DL trvají 10 ms. Každý rámeček je rozdělen na 10 dílčích rámečků o délce 1 ms a každý dílčí rámeček se skládá ze dvou slotů po 0,5 ms. Jeden rámeček tedy obsahuje 20 slotů. Obr. 3.1 ukazuje rozdělení rámečků.
2. Temporal Channel Division (TDD): V režimu TDD jsou rámce rozděleny do časových slotů, v nichž je čas pro vysílání a příjem dat přidělován dynamicky. Jeden rámeček má také délku 10 ms, ale na rozdíl od FDD se mění poměr času pro UL a DL. Například jeden rámeček může mít 6 slotů pro UL a 4 pro DL. Tato flexibilita umožňuje efektivnější využití zdrojů a přizpůsobení různým požadavkům na provoz v síti.

Zařízení LTE-M mohou být implementována s FD-FDD, HD-FDD typu B, TDD nebo jejich kombinací. To zajišťuje flexibilitu pro nasazení více pásem a možnost používat jak plně duplexní, tak poloduplexní zařízení [3].

### 3.4 Blok fyzických zdrojů

Physical Resource Block (PRB) v LTE zahrnuje 12 subnosných s odstupem 15 kHz, což odpovídá 180 kHz. Minimální jednotka prostředků pro plánování v zařízení je jeden pár PRB rozložený do dvou slotů. Pro běžnou délku Cyclic Prefix (CP) (se 7 symboly OFDM na slot) to odpovídá 12 subnosným na 14 symbolů OFDM, jak je znázorněno na obrázku 3.2 [3].



Obr. 3.1: Struktura rámce pro LTE a LTE-M [3].

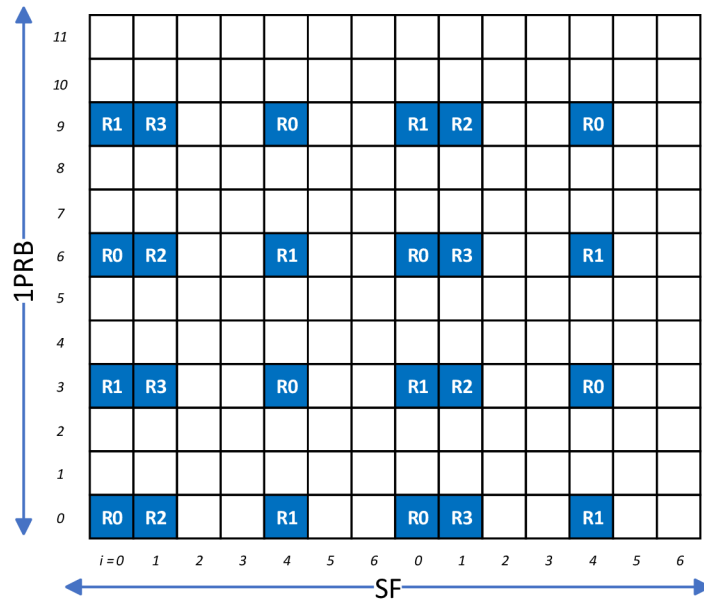
Ještě menší jednotkou prostředku používanou ve specifikacích fyzické vrstvy je Resource Element (RE), který se vztahuje k jedné subnosné v jednom symbolu OFDM. Při přenosu downlinku ze základnové stanice do účastnické stanice se každá jednotka skládá z 84 prvků zdroje ( $12 \times 7$ ). Některé z těchto prvků jsou přiděleny pro přenos referenčních symbolů, které hrají roli při koherentní demodulaci a odhadu kanálu. Tento přidělený kanálový prostředek je určen počtem bloků prostředků nebo skupin bloků prostředků [3].

Vzhledem k použití referenčních symbolů a řídicích kanálů je třeba vzít v úvahu, že přenosová rychlost může klesnout. Během přenosu dolů ze základnové stanice jsou každé anténě přiděleny pevné prvky prostředků pro přenos referenčních symbolů [3].

### 3.5 Úzkopásmový provoz

Systém LTE podporuje šířky pásma 1,4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz, včetně ochranných pásem. Maximální šířka pásma, kterou lze použít v nejširším pásmu systému bez ochranných pásem, je 100 PRB nebo 18 MHz. Běžná zařízení LTE jsou schopna vysílat a přijímat data pokrývající celou dostupnou šířku pásma systému [3].

LTE Cat-M zavádí cenově dostupná zařízení, která k vysílání a příjmu dat potřebují pouze sníženou šířku pásma. Tato zařízení jsou ve standardních specifikacích často označována jako zařízení se sníženou šířkou pásma. Nejjednodušší zařízení LTE Cat-M mohou podporovat maximální šířku pásma kanálu 6 PRB [3].



Obr. 3.2: Umístění referenčních symbolů v bloku prostředků při přenosu downlink [3].

### 3.6 Downlink

V downlinku LTE-M jsou definovány následující fyzické kanály a fyzické signály [3]:

- Physical Broadcast Channel (PBCH): Fyzický vysílací kanál, který je určen k přenosu systémových informací, jako jsou systémové parametry a konfigurace sítě.
- MTC Physical Downlink Control Channel (MPDCCH): Rozšířený fyzický řídicí kanál downlinku specifický pro scénáře hromadného připojení k internetu věcí. Poskytuje efektivní správu prostředků a zpracování řídicích signálů pro velký počet zařízení.
- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH): Fyzický sdílený kanál downlinku používaný pro uživatelská data a speciální zprávy.

Fyzické signály [3]:

- Primary and Secondary Synchronisation Signals (PSS a SSS): Primární a sekundární synchronizační signály, které pomáhají zařízení synchronizovat se sítí.
- Reference signal (RS): Referenční signál používaný pro vyhodnocení kvality kanálu a korekci chyb při příjmu dat.

Struktura podrámece DL v LTE Cat-M se liší od standardního LTE. Dílčí rámeček DL zahrnuje řídicí oblast a datovou oblast. Řídicí kanály LTE, jako jsou Physical Control

Format Indicator Channel (PCFICH), PDCCH a Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH), využívají širokopásmové pásmo, ale pro zařízení LTE Cat-M je zaveden nový úzkopásmový řídicí kanál (MPDCCH). Tento kanál je mapován do datové oblasti LTE, čímž se předchází kolizím [3].

Počáteční symbol pro vysílání MPDCCH/PDSCH v LTE Cat-M je přenášen v systémových informacích (SI) a jeho konfigurace závisí na očekávaném zatížení řídicího kanálu LTE. V případě TDD nesmí být počáteční symbol LTE Cat-M vzhledem k poloze PSS/SSS pozdější než třetí symbol [3].

## 3.7 Uplink

Ve vzestupném kanálu LTE-M jsou definovány následující fyzické kanály a fyzické signály [3]:

- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): Fyzický sdílený kanál pro vzestupný kanál, který se používá k přenosu uživatelských dat ze zařízení do sítě.
- Physical Uplink Control Channel (PUCCH): Fyzický řídicí kanál pro vzestupný kanál, který se používá k přenosu řídicích informací ze zařízení do sítě.
- Physical Random Access Channel (PRACH): Fyzický kanál s náhodným přístupem na vzestupném kanálu, který se používá k inicializaci spojení mezi zařízeními a sítí.

Fyzické signály:

- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): Referenční signál pro hodnocení kvality kanálu na fyzickém kanálu sdíleného přístupového spoje na vzestupném kanálu [3].

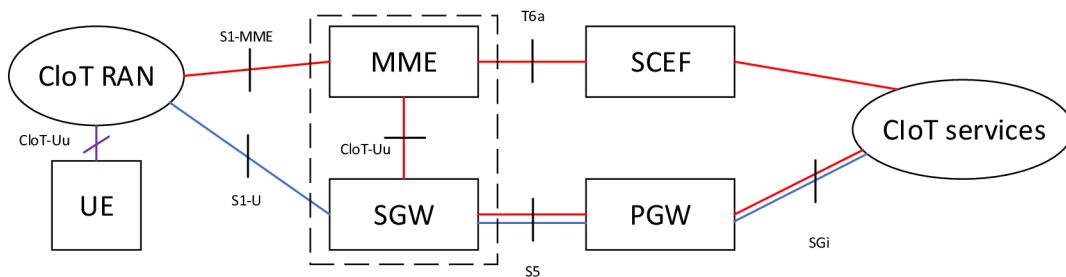
V souvislosti s přijatým přenosovým schématem UL v LTE (tj. SC-FDMA) je důležité, aby přenos ze zařízení byl ve frekvenční oblasti spojitý. Aby se maximalizovala pravděpodobnost přidělení sousedního kanálu pro předávání UL na PUSCH pro uživatele LTE i LTE-M, často se považuje za výhodné přidělit zdroje pro fyzický náhodný přístupový kanál (PRACH) a fyzický řídicí kanál uplinku (PUCCH) blízko sebe na hranicích šířky pásma systému [3].

## 3.8 Architektura sítě

LTE Cat-1 a NB-IoT spolu úzce souvisejí a vycházejí ze stávající komunikační infrastruktury LTE/LTE Advanced. Architektura LTE Cat-M, postavená na technologii LTE, poskytuje podrobnější definice, rozšiřuje funkce a mechanismy pro své současné možnosti [16].

Existují dvě hlavní možnosti připojení [17]:

1. S připojením Packet Data Network (PDN): UE naváže spojení PDN v rámci postupu připojení povinného před Rel-13.
2. Bez připojení PDN: Nová funkce v Rel-13, která umožňuje UE zůstat připojen bez připojení PDN. Užitečné pro zařízení, která zřídka přenášejí data a udržují neaktivní připojení po dlouhou dobu.



Obr. 3.3: Architektura pro komunikaci typu Machine (NB-IoT a LTE-M) [18].

Na obrázku 3.3 jsou znázorněny klíčové součásti technologie LTE [16]:

1. User Equipment (UE): přenosné zařízení, které zajišťuje připojení k bezdrátové síti.
2. Základnová stanice (eUTRAN): Vysílač rádiové přístupové sítě, který poskytuje rádiový přístup a řízení pro koncové zařízení.
3. Evolved Packet Core (EPC): Jádro technologie LTE, které zahrnuje klíčové uzly [16]:
  - Entita pro správu mobility (MME): Uzel pro správu přístupu LTE.
  - Servisní brána (SGW): Odpovídá za směrování a předávání dat.
  - Brána paketové datové sítě (PGW): Zajišťuje připojení UE k externí síti paketových dat (PDN).
  - Service Capability Exposure Function (SCEF): Poskytuje prostředky důvěryhodné identifikace služeb a schopností.
  - EPC řídí zpracování a přenos dat. Za EPC jsou data přenášena další síťovou infrastrukturou do konečného cíle, například na datový server uživatele.

### 3.9 Operační módy technologie

Pro efektivní provoz v sítích LTE-M jsou k dispozici dva režimy [3]:

#### 1. Režim IDLE [3]:

- Počáteční výběr buněk: Zařízení vybere počáteční buňku pro vstup do sítě.
- Získání SI (systémových informací): Získá systémové informace pro správnou konfiguraci.
- Opětovný výběr buňky: Opětovně vyhodnotí dostupné buňky pro optimální připojení.
- Paging Processes: Zařízení čeká na volání a zprávy.

#### Připojený režim [3]:

- Plánování přenosu: Optimalizované plánování přenosu.
- Opětovný přenos: Opětovný přenos dat v případě ztráty nebo chyby.
- Správa napájení: Efektivní řízení spotřeby energie zařízení.
- Mobilita: Umožňuje mobilitu zařízení v rámci sítě.

Přechod z režimu IDLE do režimu Connected zahrnuje postupy náhodného přístupu (RA) a řízení přístupu.

### 3.9.1 Režimy snížené spotřeby

3GPP Rel 13 zavedl nové funkce pro technologii LTE-M včetně Cat M1, jako je režim úspory energie (PSM), režim eDRX - A a B pro zvýšení pokrytí [3].

Podle sekce 3.9 mohou být zařízení v různých stavech v závislosti na jejich komunikačních potřebách. V režimu Connected zařízení přenáší data a v režimu IDLE není ani při delší nečinnosti nutná žádná komunikace [3].

## 3.10 Role 3GPP při standardizaci a zdokonalování LTE Cat-M

LTE-M využívá příslušnost ke standardům 3GPP a umožňuje pohodlnou aktualizaci softwaru ze standardních systémů 4G LTE. Doplňuje také NB-IoT a vytváří tak harmonizovanou sadu technologií pro různé potřeby internetu věcí. Důležitým aspektem vývoje LTE-M je jeho použití v privátních sítích, což otevírá nové možnosti při zavádění a správě sítí a také poskytuje efektivní cestu k přechodu na síť 5G, čímž zajišťuje flexibilitu a dlouhodobou podporu pro různé scénáře využití IoT [3].

### 3.10.1 První verze systému LTE-M

Verze 12 byla pro společenství IoT důležitá, protože jim umožnila začít zkoumat metody, jak snížit náklady na zařízení a učinit je atraktivními pro nízkourovňové

aplikace MTC, které byly dříve nasazeny v sítích GSM/GPRS. Později toho inženýři dokázali dosáhnout snížením maximální rychlosti a šířky pásma. A také díky přechodu modulu na poloduplexní provoz [3].

Důležitým bodem výzkumu bylo také dosažení pokrytí (CE) o 20 dB lepšího než u stávajících sítí LTE. Tím, že inženýři začali používat různé techniky pro prodloužení doby přenosu a využití retranslace, dosáhli reálných výsledků 15 dB. Následující verze 14 navázala na dříve popsane myšlenky zavedením zařízení Cat-M2 [3].

Jeho hlavními výhodami jsou [3]:

- Podpora vyšších rychlostí přenosu dat, protože stále existují rozsáhlé aplikační oblasti, jako jsou nositelná zařízení, kde je třeba, aby se rychlost přenosu dat blížila rychlostem poskytovaným zařízeními 3G nebo LTE Cat-M1.
- Vícesměrové vysílání založené na struktuře služby MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service), reprezentované jako Single Cell Point-To-Multipoint SC-PTM (point-to-multipoint). Toto řešení je sice podobné SC-PTM pro běžná zařízení LTE, ale zahrnuje podporu úzkopásmového režimu a lepší pokrytí pro LTE Cat-M a NB-IoT.
- Vylepšené určování polohy s možností konfigurace určování polohy referenčního signálu PRS, což umožňuje zařízením LTE-M dosáhnout přesnosti určování polohy podobné jako u běžných zařízení LTE.
- Vylepšená mobilita s plnou podporou mobility v připojeném režimu, včetně měření RSRQ uvnitř frekvence a RSRP/RSRQ mezi frekvencemi.

Hlavní rozdíly mezi verzemi 13 a 14 LTE Cat-M jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tab. 3.1: Porovnání specifikací LTE Cat-M1 a LTE Cat-M2 [3].

Atribut	LTE-M	
	Rel 13	Rel 14
Spektrum	LTE Pásma	
Typická MNO	Dobré pokrytí LTE	
Šířka pásma	1.08MHz (CAT-M1)	5 MHz (CAT-M2)
Počet antén	1	
Duplexní režimy	HD-FDD, FD-FDD, TDD	
Modulace	QPSK, 16QAM	
Maximální rychlost	1 Mbit/s	Přibližně 7 Mbit/s



### 3.10.2 Verze 15

Verze 15 se zaměřuje na zlepšení latence, spektrální účinnosti a energetické efektivity. Zpoždění se snižuje díky optimalizaci doby akvizice a podpoře včasného přenosu. Spektrální účinnost je zlepšena v DL použitím vyšší modulace a v UL podrobným přidělováním prostředků [16].

Pro snížení spotřeby energie jsou zavedeny funkce, jako jsou signály probuzení a vylepšená zpětná vazba HARQ. Nová rádiová konstrukce zahrnuje uvolněné řízení opětovného výběru buňky a účinnější správu rádiových prostředků. Byly přidány nové třídy vysílacího výkonu [16].

Mezi důležitá vylepšení patří optimalizované řízení zátěže a rozšířená podpora spektra TDD s další flexibilitou nasazení [16].

### 3.10.3 Verze 16

Verze 16 zavádí vylepšení pro LTE-MTC, která zlepšují spektrální účinnost a snižují spotřebu energie [19].

Tyto změny zahrnují [19]:

Vylepšený časný přenos dat:

- Mobilní zařízení v pohotovostním režimu mohou přijímat data bez přepnutí do připojeného režimu.
- Signalizace probuzení pro skupinu zařízení snižuje spotřebu energie.

Efektivní využití zdrojů [19]:

- Jedna signalizace probuzení může spravovat až 8 skupin zařízení.
- Uplink signalizace využívá předem nakonfigurované zdroje v pohotovostním režimu, čímž se vyhýbá složitým postupům náhodného přístupu.

Plánování bloků pro více tranzitů:

- Efektivní přidělování zdrojů v sestupném a vzestupném směru, což snižuje náklady na řídicí signalizaci.

Zlepšená kvalita přenosu [19]:

- Kvalita přenosu se zlepšuje v klidovém i připojeném režimu a zlepšuje přizpůsobení kanálu.

Zmírněné požadavky na měření [19]:

- Menší požadavky na měření v obslužné buňce pro pevná zařízení.

Spektrální koexistence s NR [19]:

- Výzkum a zlepšení výkonu pro koexistenci sítí NR a LTE-MTC v různých aspektech nasazení.

Verze 16 rovněž definuje funkce umožňující zařízením LTE-MTC připojení k síti 5G (5GC), včetně podpory stavu Radio Resource Control\_INACTIVE (RRC\_INACTIVE), optimalizace uživatelské roviny CIoT ve stavu RRC\_IDLE [19].

### 3.10.4 Verze 17

Ve verzi 17 bude vývoj LTE omezen vzhledem k vyspělosti technologie rádiového přístupu, která již nespĺňuje všechny požadavky dnešních scénářů využití internetu věcí. Proto 3GPP zavedlo podporu pro zařízení NR nebo RedCap, aby účinně řešilo scénáře, pro které LTE přestává stačit. RedCap poskytuje následující klíčové schopnosti zděděné z NR: Široký frekvenční rozsah [19]:

- Podpora milimetrových vln a dalších frekvencí pro zajištění rozšířeného pokrytí.

Energetická účinnost [19]:

- Využívá ultrarealistický design pro zlepšení energetické účinnosti sítě.

Kompatibilita vzdušného rozhraní [19]:

- Kompatibilita s přímým a paprskovým vzdušným rozhraním pro optimalizaci přenosu dat.

Připojení k síti 5G [19]:

- Možnost připojení k páteřní síti 5G (5GC) pro zajištění síťových výhod.
- Umožnění lepší koexistence s ostatními službami 5G u operátorů NR.

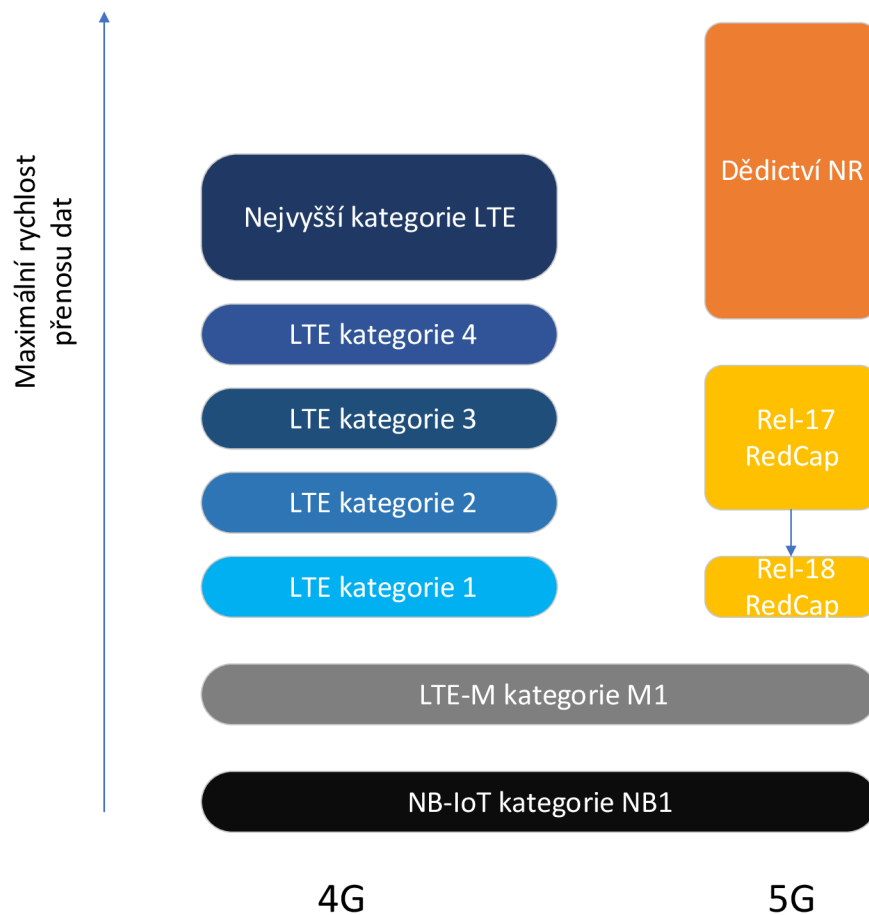
Požadavky RedCap zahrnují dodržování cílového pokrytí, které je v souladu se zařízeními NR Release 15/16. Standard 3GPP rovněž zajišťuje, že RedCap lze nasadit v různých frekvenčních pásmech a pásmech s časovým dělením, včetně frekvenčních pásem 1 (FR1) a 2 (FR2) s frekvencemi od 0,4 do 7,1 GHz, resp. 24,2 až 52,6 GHz [19].

### 3.10.5 Verze 18

Verze 18 přináší další kroky k rozšíření podpory zařízení RedCap NR zavedením funkcí zaměřených na nové scénáře použití 5G. Mezi tyto scénáře patří chytré město a elektronické zdravotnictví. Rozšířené funkce RedCap ve verzi 18 jsou navrženy tak, aby umožnily efektivní nasazení 5G v různých odvětvích, kde mohou být klíčovým prvkem infrastruktury zařízení se zdravotním postižením [20].

Další funkce určené pro podporu chytrého města mohou zahrnovat vylepšené funkce propojené mobility, senzory pro sběr a zpracování dat v reálném čase a zajištění spolehlivé a efektivní komunikace v městském prostředí [20].

Ve scénáři elektronického zdravotnictví se mohou funkce zaměřit na zajištění spolehlivého přenosu dat zdravotnických zařízení, včetně senzorů a zdravotnických přístrojů pro monitorování pacientů. To může zahrnovat podporu vysokých standardů bezpečnosti a spolehlivosti pro zajištění důvěrnosti lékařských údajů. Očekává se, že vydání 3GPP Release 18, které je naplánováno na 1. čtvrtletí 2024, přinese do segmentu IoT další inovace a také omezení možností 5G pro použití v zařízeních IoT [20].



Obr. 3.4: Znázornění typů zařízení 4G a 5G [20].

Sliby 5G pro masové využití internetu věcí se pravděpodobně začnou naplňovat až v roce 2026 nebo ještě později. Do té doby většina sítí plánuje nadále obsluhovat zařízení IoT pomocí technologie 4G, zatímco úsilí v oblasti 5G se zaměří na širokopásmovější aplikace.[20]

### 3.10.6 Srovnání posledních verzí LTE-M

Obrázek 3.4 ukazuje různé typy zařízení 4G/5G. V dolním segmentu jsou zařízení NB-IoT (Cat-NB1) a LTE-M (Cat-M1) pro masivní internet věcí. Od verze 3GPP 15 jsou kompatibilní s hromadnou komunikací mezi stroji 5G (mMTC). Ve vyšším segmentu poskytují LTE a NR vysokorychlostní zařízení pro náročné scénáře. Mezi dolním a horním segmentem nabízí LTE několik kategorií zařízení (např. Cat-1/2/3/4) a RedCap poskytuje příslušné typy zařízení na bázi NR pro střední segment [20].

Jak již bylo uvedeno dříve, hlavním cílem dalších verzí je zlepšit výdrž baterie, latenci zpráv a další výkonnostní aspekty. LTE-M se ve vydáních 3GPP dále vyvíjelo a poskytovalo více funkcí a lepší efektivitu pro masové aplikace internetu věcí. Následně došlo k vylepšení na zařízení RedCap, čímž se jeho funkce rozšířily na síť 5G. Hlavní rozdíly mezi jednotlivými verzemi LTE-M jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab. 3.2: Vývoj LTE-M [3], [20], [19].

Atribut	LTE-M		eMTC		RedCap
	Rel 13	Rel 14	Rel 15	Rel 16	Rel 17
Spektrum	LTE Pásmo		LTE Pásmo		FR1, FR2
Typická MNO	Dobré pokrytí LTE		Dobré pokrytí LTE		Omezeno na NR
Počet antén	1		1		1 vysílací anténa 2 přijímací antény
Duplexní režimy	HD-FDD, FD-FDD,TDD		HD-FDD, FD-FDD,TDD		HD-FDD, FD-FDD,TDD
Modulace	QPSK, 16QAM		64QAM		64QAM, 256QAM
Maximální rychlost	1 Mbit/s	Přibližně 7 Mbit/s	Přibližně 7 Mbit/s		150 Mbit/s
Šířka pásma	1.08MHz (CAT-M1)	5 MHz (CAT-M2)	5 MHz		20, 100 MHz

## 4 Network Simulator 3

### 4.1 Základní popis

Síťový simulátor je program, který emuluje chování sítě bez nutnosti skutečného síťového připojení. V oblasti počítačových sítí je síťová simulace důležitou metodikou vývoje, protože poskytuje způsob, jak emulovat výkon a chování síťových protokolů [21].

NS-3 je síťový simulátor s architekturou diskretních událostí, prioritně určený pro vzdělávací a výzkumné účely. NS-3 je implementován v jazyce C++ a je licencován pod licencí GNU General Public Licence verze 2 (GPLv2) a je k dispozici ve veřejné doméně pro výzkum a vývoj. Jelikož se jedná o knihovnu, lze ji staticky nebo dynamicky připojit k hlavnímu programu v C++, který definuje topologii simulace a spouští simulační proces [22].

Hlavními objekty simulátoru jsou balíčky uspořádané v adresáři src/network. Tyto hardwarové a síťové moduly tvoří společné jádro simulátoru a zajišťují nezávislost na konkrétním síťovém modelu. Součástí simulátoru je také generátor pseudonáhodných čísel (PRNG), který doplňuje jeho funkce [22].

Díky volnému zdrojovému kódu a zaměření na vzdělávací a výzkumné účely je NS-3 atraktivní volbou pro simulaci a analýzu sítí. Poskytuje podporu, konfiguraci, běh, vizualizaci a možnosti monitorování síťových procesů, což z něj činí optimální nástroj pro úlohy této práce.

### 4.2 Dostupné moduly pro simulátor

Pro NS3 existuje několik základních modulů pro simulaci. My se zaměříme na moduly LENA, které poskytují podporu pro mMTC.

#### 4.2.1 LENA

Modul LENA, vyvinutý Technickým centrem pro telekomunikace Katalánské univerzity (CCTC), je open source software, který rozšiřuje síťový simulátor NS-3. K jeho vytvoření vedla potřeba navrhovat a testovat co nejrealističtější síť LTE, například síť s vyrovnáváním zátěže a síť s více přístupovými technologiemi (Multi-RAT) [23].

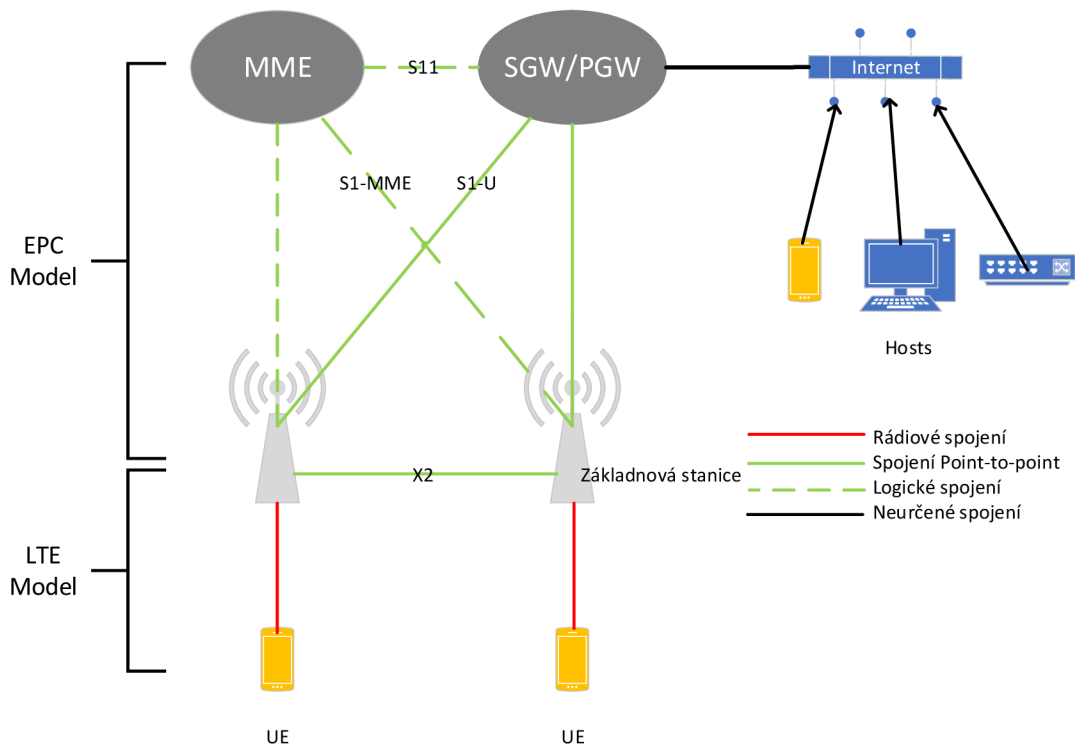
Modul LENA lze rozdělit na dvě hlavní části [23]:

1. Model LTE: Zahrnuje protokoly rádiového rozhraní LTE, jako je řízení rádiového spoje (RLC), vrstva přístupu ke středisku (MAC), řízení rádiových prostředků (RRC), řízení konvergence paketových dat (PDCP) a fyzická vrstva

(PHY).

2. Model EPC: Obsahuje protokoly a entity páteřní sítě (SGW, PGW, MME, eNB) a je určen k zajištění konektivity IP end-to-end v modelu LTE. Model podporuje protokol IPv4 a může využívat různé aplikace simulátoru NS-3 využívající transportní protokoly TCP a UDP.

Obr. 4.1 je znázorněna infrastruktura sítě LTE s využitím modulu LENA.



Obr. 4.1: Přehled LENA simulačního modelu [23].

Pro podporu a hodnocení sítí jsou definovány požadavky na modelování LTE, včetně správy rádiových zdrojů, koordinace rušení, dynamického přístupu ke spektru (DSA), plánování paketů s kvalitou služby (QoS) [23].

Modul LENA, založený na síťovém simulátoru NS-3, je určen k vývoji a testování algoritmů pro správu sítí LTE, vyrovnávání zátěže, heterogenní systémy, Multi-RAT a další technologie. Jeho flexibilita umožňuje přizpůsobení parametrů sítě LTE, což je výhodou při zavádění technologie LTE Cat-M [23].

Tento simulátor poskytuje možnost realisticky simulovat scénáře, jako je vyvažování zátěže a sítě Multi-RAT, což z něj činí cenný nástroj pro vývojáře a výzkumníky v oblasti sítí LTE a jejich vývoje.

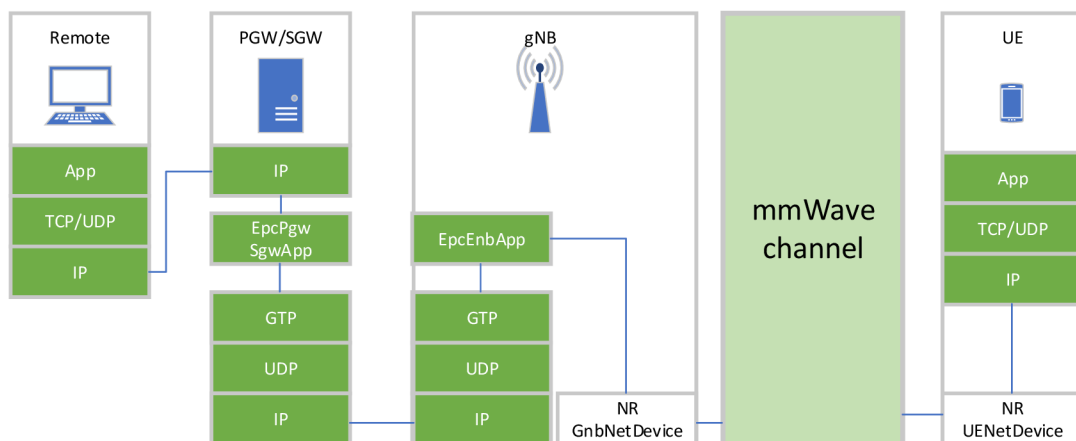
## 4.2.2 5G-LENA

Během vývoje nových přístupových technologií pro pátou generaci mobilních sítí. bylo nutné vyvinout nový modul pro modulaci komunikace na milimetrových vlnách (mmWave).

Tým z Newyorské univerzity (NYU) ve spolupráci s Padovskou univerzitou a NYU Wireless připravil první verzi simulátoru, který obsahuje upravenou fyzickou (PHY) a přístupovou vrstvu média (MAC) přizpůsobenou tak, aby efektivně podporovala mmWave kanály, modely šíření, formování paprsku a antény. Jeho možnosti však byly velmi omezené. Proto později vývojáři ze společnosti InterDigital Communications Inc. za finanční podpory Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) představili novou verzi modulu [24].

Nový modul je ve své podstatě velkým přepracováním předchozího modulu se zaměřením na požadavky 3GPP Release-15 NR. Jeho funkčnost byla rozšířena o klíčové vlastnosti PHY-MAC NR, jako je flexibilní struktura rámce, podpora více numerologií, části šířky pásma, numerologie multiplexu s frekvenčním dělením (FDM), ortogonální vícenásobný přístup s frekvenčním dělením (OFDMA), flexibilní časové a frekvenční přidělování a plánování zdrojů, kódování datového kanálu s nízkou hustotou parity (LDPC), modulační a kódovací schémata (MCS) až do 256-QAM a dynamické TDD [24].

Modul NR zachovává závislost na vyšších vrstvách a páteřní síti (RLC, PDCP, RRC, NAS, EPC) na základě modulu NS-3 "LTE", čímž poskytuje nestandardní implementaci NR (NSA). Modul 'NR' v NS-3 je určen pro modelování mobilních sítí typu end-to-end podle standardů 3GPP [24].



Obr. 4.2: Přehled tříd od konce ke konci [24].

Na obrázku 4.2 je znázorněn vzdálený uzel připojený k uzlu NR, který je připojen k PGW/SGW. Toto spojení může v ns-3 využívat různé technologie. V SGW/PGW je paket zapouzdřen protokolem GTP. Paket se dostane do gNB prostřednictvím spojení IP, které představuje tranzitní spoj sítě NR [24].

Po dekapulaci v gNB je paket směrován uvnitř zásobníku NR prostřednictvím NRGnbNetDevice. Správně přijatý paket v UE je předán vyšším vrstvám pomocí NRUENetDevice. Opačná cesta v případě UL je podobná té, která byla popsána výše [24].

### 4.2.3 LENA-NB(Narrowband)

S rostoucím počtem malých zařízení v internetu věcí je stále důležitější efektivně řídit přenos malých dat. Standard 3GPP Release 15 zavádí funkci "Early Data Transfer" pro úzkopásmové sítě internetu věcí (NB-IoT), jejímž cílem je snížit celkovou režii. Vývojáři z Institutu pro síťové komunikace na Technické univerzitě v Dortmundu (TU Dortmund University) představili implementaci NB-IoT v ns-3 nazvanou LENA-NB [25].

LENA-NB zahrnuje optimalizaci Cellular-IoT C-plane, funkci včasného přenosu dat, proceduru obnovení RRC a také nový plánovač napříč podřádky, adaptivní modulaci a kódování a podrobný energetický stavový stroj. Tento nástroj umožňuje porovnat výkonnost různých přenosových režimů NB-IoT, což vede k závěru o výhodách včasného předání. Implementace LENA-NB poukazuje na zlepšení latence, životnosti baterie a spektrální účinnosti, zejména při velkém počtu připojených zařízení [25].

Pátá generace mobilních komunikací (5G) řeší problémy energeticky a spektrálně účinného přenosu dat pro internet věcí (IoT) a umožňuje vysokou hustotu zařízení. Komunikace mMTC stanovuje požadavky na masivní aplikace internetu věcí. Úzkopásmový internet věcí (NB-IoT), odvozený od LTE, je určen pro efektivní přenos dat s šířkou pásma 180 kHz. Cílem NB-IoT je poskytnout připojení pro více zařízení s dlouhou výdrží baterií, hlubokým průnikem do vnitřních prostor a minimalizací latence na 10 sekund [25].

Na rozdíl od sítí LPWAN, jako je LoRaWAN, jsou přenosy NB-IoT centrálně koordinovány, aby se snížilo riziko kolize dat a optimalizovala se kapacita buňky. Optimalizace NB-IoT zahrnuje postup RRC, režim přenosu dat C-IoT-Opt. 3GPP Rel. 15 zavádí režim včasného přenosu dat (EDT), který slibuje snížení režie pro malé datové přenosy. Cílem těchto změn je snížit režii a zlepšit energetickou a spektrální účinnost v rozsáhlých sítích [25].

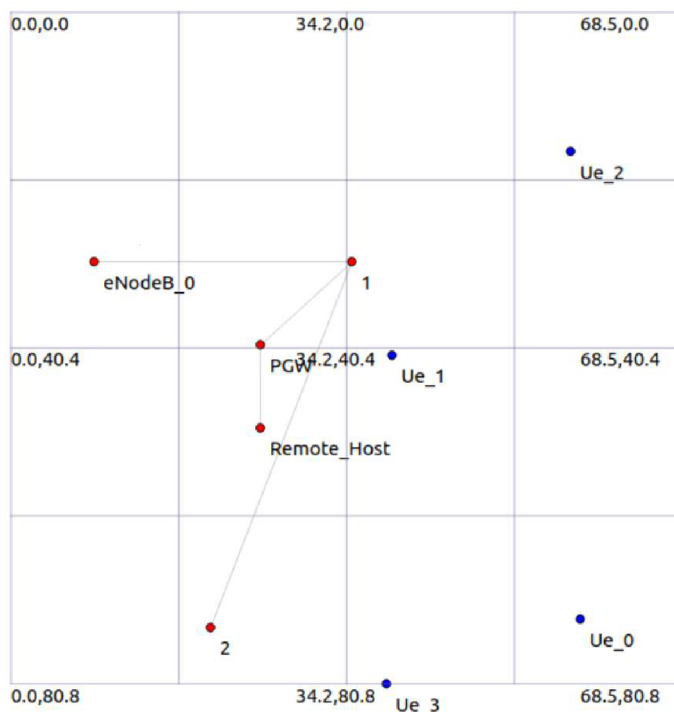


## 5 Komunikační scénář pro mMTC

### 5.1 Základní komunikační scénář pro mMTC

Pro základní komunikaci UE se základnovou stanicí (eNodeB) byl zvolen modul LENA, který v simulátoru NS3 zajišťuje všechny potřebné komunikační požadavky pro síť LTE.

Jako implementace modulu LENA v simulátoru NS-3 byl zvolen scénář *lte-full.cc*, který zajišťuje standardní komunikaci zařízení s jádrem EPC. Jeho počáteční parametry zahrnují 4 zařízení UE a jednu stanicí eNodeB. Do jeho síťové topologie je zahrnut také vzdálený hostitel a brána PGW. Topologie sítě je znázorněna na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Topologie sítě v programu NetAnim.

V tomto scénáři je datový tok generován Bulk aplikací na protokolu TCP. Vzhledem k tomu, že tento provoz je potvrzen, jsou primárními daty pro analýzu pakety ve směru nahoru. Definice aplikace je uvedena ve výpisu 5.1.

Hlavní parametry základního scénáře jsou shrnuty v tabulce 5.1, přičemž počet zařízení v síti se postupně zvyšuje. Tyto parametry již nejsou ve scénáři přerazdělovány a jsou nastaveny jako výchozí.

Obr. 5.2 ukazuje průměrnou rychlost přenosu dat pro každé zařízení v tomto scénáři, vykreslenou pomocí Gnuplot na vygenerovaných datech z modulu *FlowMo-*

Tab. 5.1: Parametry základního scénáře.

Parametr	Hodnota				
Počet koncových zařízení (UE)	4	14	21	32	40
Počet základnových stanic (eNodeB)	1	1	1	1	1
Počet vzdálených uživatelů	1	1	1	1	1
Čas simulace	10 s	10 s	10 s	10 s	10 s
Periodicita signálu SRS	40 ms	40 ms	40 ms	40 ms	40 ms
Oblast nasazení UE	5.5 km <sup>2</sup>	8.4 km <sup>2</sup>	10 km <sup>2</sup>	10 km <sup>2</sup>	10 km <sup>2</sup>
Interval mezi pakety	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms
Maximální vysílací výkon UE	23 dBm	23 dBm	23 dBm	23 dBm	23 dBm
Zpoždění UL	21 ms	60 ms	80 ms	120 ms	140 ms
Průměrná rychlost UL	1300kbps	840kbps	570kbps	380kbps	300kbps
Šířka pásma	5 MHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz
Použitý protokol transportní vrstvy	TCP	TCP	TCP	TCP	TCP

*nitor*, který zobrazuje výkonnost sítě. Při zvýšení počtu zařízení v síti na 40 se sníží rychlost a zvýší latence, ale zachová se stabilní přenos dat mezi zařízeními nahore i dole v kanálu. Obr. 5.3 ukazuje topologii sítě pro 40 zařízení na ploše 10 km<sup>2</sup>. Umístění těchto zařízení UE vzhledem k základnové stanici je náhodné a v tomto scénáři je určeno funkcí *RandomDiscPositionAllocator*.

```

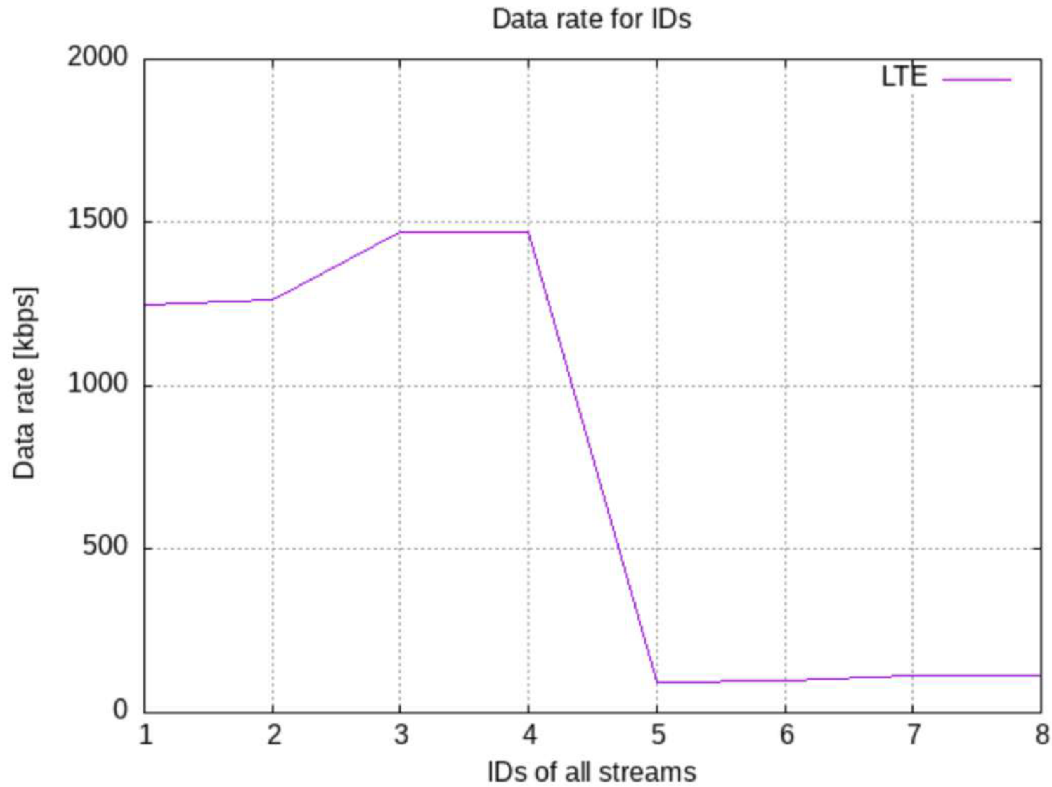
1 // Create a BulkSendApplication and install it on node 0
2 uint16_t port = 9; // well - known echo port number
3 ApplicationContainer sourceApps;
4 for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++)
5 {
6     // Set the amount of data to send in bytes. Zero is unlimited .
7     BulkSendHelper source("ns3::TcpSocketFactory",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

```

Výpis 5.1: Základní nastavení Bulk aplikace pro generování dat.

Problémem tohoto scénáře je, že většina parametrů sítě není definována v samotném scénáři a je zvolena jako výchozí parametry. Pro základní scénář byl tedy

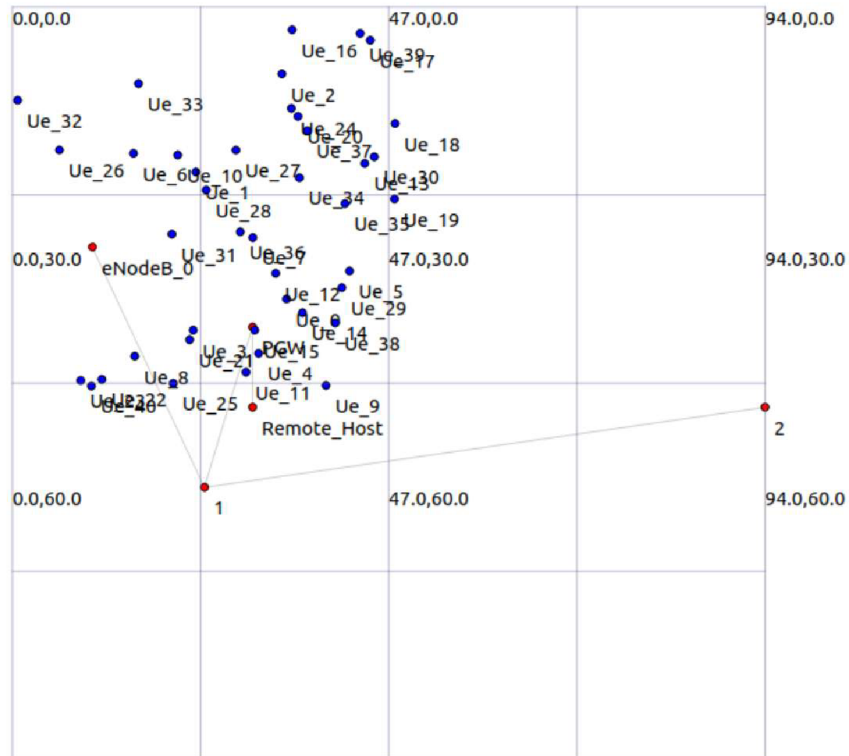
parametr Sounding Reference Signal (SRS) nastaven na hodnotu 40. Což znamená, že jakmile začneme zvyšovat počet zařízení na vyšší hodnoty, narazíme na první problémy v síti. Některé pakety budou odpadat najednou a síť bude přetížena dříve, než se podaří odeslat celý datový tok nahoru nebo dolů.



Obr. 5.2: Průměrná rychlost pro tento scénář

Tento parametr SRS je referenčním signálem, který se používá pro eNodeB v LTE k vyhodnocení kvality kanálu uplink pro každý podsektor frekvenční oblasti. Tento signál pomáhá určit, která část šířky pásma systému má pro konkrétní uživatelské zařízení (UE) v daném čase nejlepší kvalitu kanálu.

UE vysílá SRS podle konfigurace určené signalizačními zprávami, jako jsou SIB2, RRC Connection Setup, RRC Connection, RRC Reconfiguration a další. Perioda vysílání SRS se může lišit v závislosti na nastavených parametrech a může být nakonfigurována na vysílání každé dva podrámce až každých 32 rámců (320 podrámce). Není nutné ji zahrnout do každé konfigurace UE, ale tímto způsobem můžeme umožnit lepší přidělení prostředků v síti zvýšením počtu zařízení.



Obr. 5.3: Topologie sítě pro 40 UE v softwaru NetAnim.

## 5.2 Rozšířený testovací scénář

Protože technologie LTE CAT-M zahrnuje mnohem větší počet zařízení v síti s malou šířkou pásma. Je nutné určit klíčové změny modulu LENA, které zlepší výkonnost sítě. Některé změny jsou již definovány v modulu LENA-NB, což umožňuje jejich přímé začlenění do tohoto scénáře. Část úprav lze identifikovat v samotném scénáři, některé však vyžadují podrobný rozpis.

Pro tento scénář bylo identifikováno několik klíčových úprav, které umožní dosáhnout požadavku mMTC:

- Stanovení parametrů SRS
- Implementace kontrolních zpráv
- Omezení MCS a CQI
- Implementace PSM a eDRX
- Uvolnění RRC
- Úprava parametrů scénáře

Tyto úpravy modernizují modul LENA na požadavky LTE Cat M.

## 5.2.1 Stanovení parametrů SRS

Nejprve je třeba nadefinovat parametr SRS. To je nutné, aby eNodeB mohla vyhodnotit informace o stavu kanálu (CSI). Maximální periodičita SRS je 320 ms podle doporučení 3GPP definovaných v tabulce 5.2.

Tab. 5.2: Specifikace signálů SRS [26].

Index konfigurace $I_{SRS}$	Periodičita $T_{SRS}$ [ms]	Subrames [ms]
0-1	2	$I_{SRS}$
2-6	5	$I_{SRS}-2$
7-16	10	$I_{SRS}-7$
17-36	20	$I_{SRS}-17$
37-76	40	$I_{SRS}-37$
77-156	80	$I_{SRS}-77$
157-316	160	$I_{SRS}-157$
317-636	320	$I_{SRS}-317$
637-1023	rezerva	rezerva

Tuto úpravu je třeba provést v samotném scénáři a v souborech *lte-phy.cc* a *lte-enb-rrc.cc*, kde jsou definovány parametry sítě. Tyto změny jsou shrnuty ve výpisech 5.2 a 5.3.

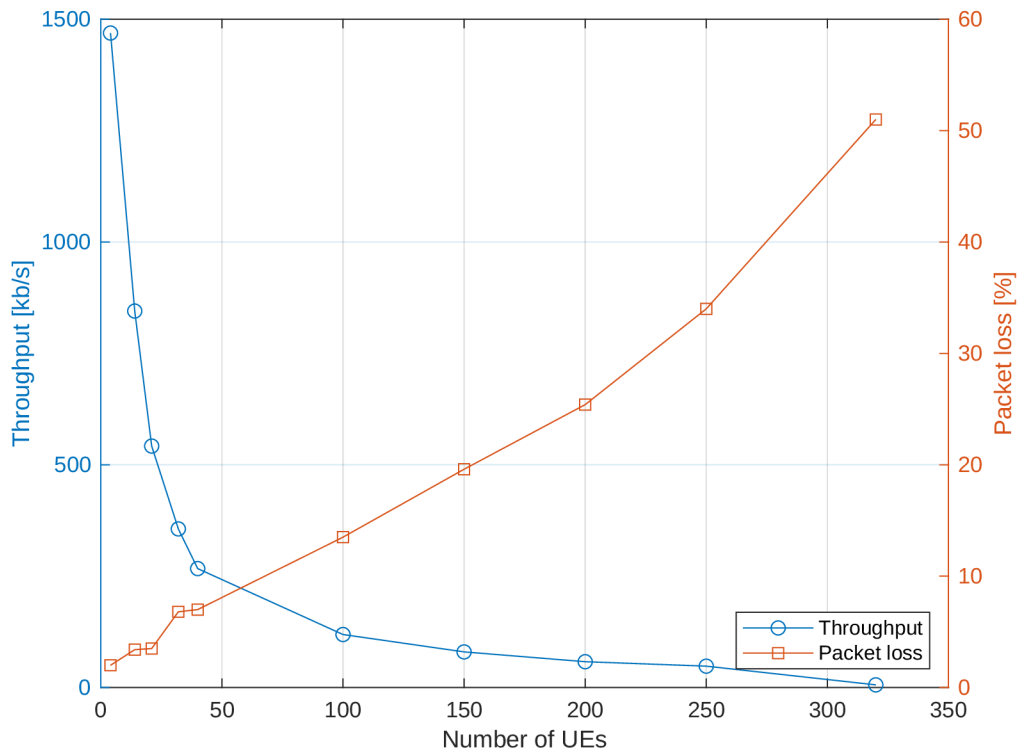
```
1 static const uint32_t g_srsPeriodicity[SRS_ENTRIES] = {0, 2, 5, 10,
    20, 40, 80, 160, 320, 640};
2 static const uint32_t g_srsCiLow[SRS_ENTRIES] = {0, 0, 2, 7, 17,
    37, 77, 157, 317, 637};
3 static const uint32_t g_srsCiHigh[SRS_ENTRIES] = {0, 1, 6, 16, 36,
    76, 156, 316, 636, 1276};
```

Výpis 5.2: Úprava kódu lte-enb-rrc.cc.

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

Výpis 5.3: Úprava kódu lte-full.cc.

Tyto úpravy pomohou síti dosáhnout 320 zařízení připojených k jedné základnové stanici. Problémem této úpravy je, že se zvýší počet zařízení, ale síť bude přetížená. Jak je vidět na obrázcích 5.4 a 5.5 s hodnotami průměrného přenosu dat, latence a ztráty paketů, tyto údaje přímo souvisejí s počtem zařízení v síti tohoto scénáře. Porovnáme-li získané údaje s tabulkou 5.1, je možno konstatovat, že rychlost přenosu dat klesá s každým novým zařízením, což odpovídá reálné situaci ve scénářích mMTC, kdy základnová stanice obsluhuje od jednoho do několika set UE.



Obr. 5.4: Propustnost a ztrátovost paketů v závislosti na počtu UE.

Obrázek 5.4 ukazuje, že maximální rychlosti je dosaženo při nejmenším počtu zařízení v síti. S dalším zvyšováním počtu zařízení UE v síti začíná přenosová rychlost klesat, přičemž k největšímu poklesu dochází u prvních 40 zařízení a v závěrečných testech klesá pod 1 kb/s. Navíc v důsledku zatížení sítě dosahuje ztráta paketů u každého zařízení 50%.

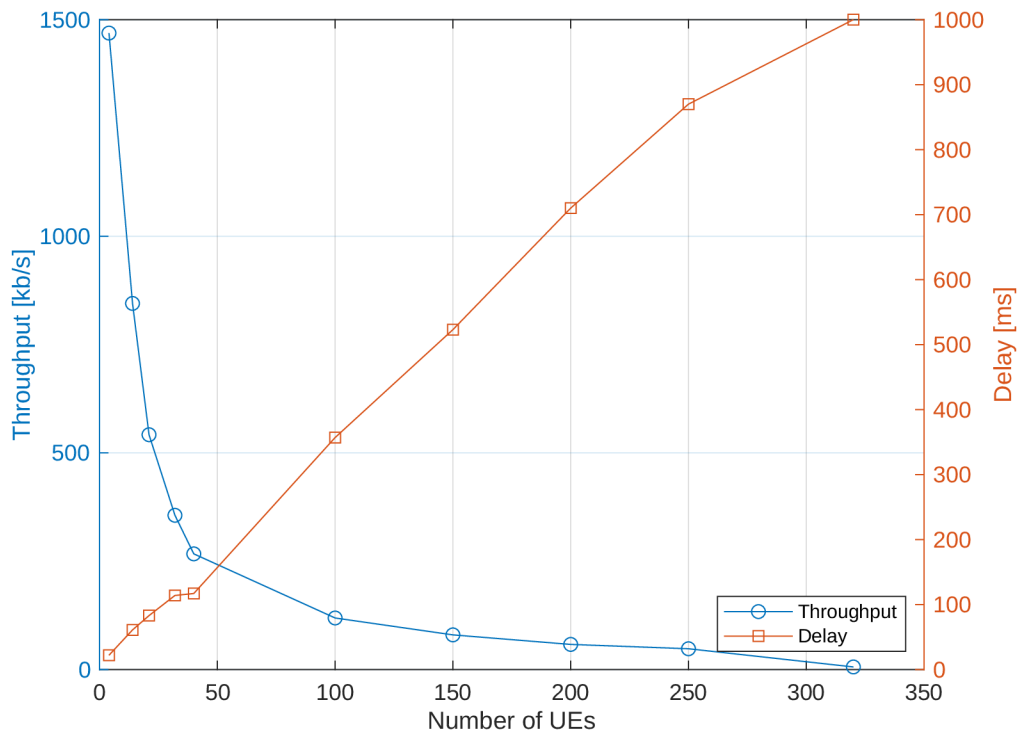
Podobná situace nastává i u zpoždění zobrazeného na obrázku 5.5, které dosahuje hodnot vyšších než 1000 ms.

Další úpravy pomohou dosáhnout lepší ztrátovosti paketů a rychlosti přenosu dat.

## 5.2.2 Implementace kontrolních zpráv

Než přejdeme k implementaci řídicích zpráv, je nutné nastínit fyzickou vrstvu LTE Cat-M v kontextu činností v síťovém režimu. Technologie LTE Cat-M zahrnuje režim IDLE, který zahrnuje postupy výběru buňky, pagingové procesy a další. A také režim Connected, který odpovídá za plánování přenosu dat, řízení výkonu a mobility [3].

V režimu IDLE je první prioritou výběr buňky. Postup výběru buňky LTE Cat-M zahrnuje vyhledání primárního synchronizačního signálu (PSS) pro určení dostupné buňky LTE, synchronizaci se sekundárním synchronizačním signálem (SSS) pro určení časových parametrů rámce. Následuje zjištění hlavního informačního



Obr. 5.5: Zpoždění při přenosu dat v kanálu směrem nahoru.

bloku (MIB), který obsahuje informace o šířce pásma downlinku (DL) a rozvrhu pro systémový informační blok (SIB) [3].

Tyto změny jsou uvedeny ve výpisu 5.4.

```

1 class MibM1LteControlMessage: public LteControlMessage
2 {
3 public:
4     MibM1LteControlMessage (void);
5     void SetMibM1 (M1LteRrcSap::MasterInformationBlockM1 mibM1);
6     M1LteRrcSap::MasterInformationBlockM1 GetMibM1 () const;
7 private:
8     M1LteRrcSap::MasterInformationBlockM1 m_mibM1;
9 }; // end of class MibM1LteControlMessage
10 class Sib1M1LteControlMessage : public LteControlMessage
11 {
12 public:
13     Sib1M1LteControlMessage (void);
14     void SetSib1M1 (M1LteRrcSap::SystemInformationBlockType1M1 mibM1)
15         ;
16     M1LteRrcSap::SystemInformationBlockType1M1 GetSib1M1 () const;
17 private:
18     M1LteRrcSap::SystemInformationBlockType1M1 m_sib1M1;};

```

Výpis 5.4: Úprava kódu lte-control-messages.h.

Vzhledem k tomu, že bloky SIB v LTE Cat-M se liší od původních bloků v LTE, je třeba provést změny v souboru *lte-control-messages.h* podle specifikací verze 13. Výsledkem těchto změn je lepší distribuce sítě na fyzické vrstvě a optimalizace zdrojů.

### 5.2.3 Omezení MCS a CQI

Pro správný přenos jednosměrných dat musí být správně definovány modulační a kódovací schémata (MCS) a velikost transportního bloku (TBS). Tyto hodnoty jsou nezbytné pro nastavení správného typu modulace v kanálech PUSCH a PDSCH [3].

Tab. 5.3: PUSCH modulace, kódování a TBS index v LTE Cat-M [3].

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

Hodnoty MCS a TBS pro PUSCH nastavené v Release 13 jsou uvedeny v Tab. 5.3. Tyto stavy jsou popsány v souboru *lte-amc.cc*, kde lze nastavit požadované parametry pro technologii podle verze 13.

Po uplatnění změn ve výpisu 5.5 se sníží rychlost kanálu směrem nahoru v důsledku omezení MCS a změny modulačního schématu.

Cílem všech dalších úprav je přizpůsobit scénář podmínkám reálného chování sítě a přidání funkcí vyhovujících standardu LTE Cat M.



```

1 static const int ModulationSchemeForMcs[17] = { 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2,
2         2, 2, 2, 2, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4};
3 static const double SpectralEfficiencyForMcs[17] = { 0.15, 0.19,
4         0.23, 0.31, 0.38, 0.49, 0.6, 0.74, 0.88, 1.03, 1.18, 1.33, 1.48,
5         1.7, 1.91, 2.16, 2.41};
6 static int MaxMcs = 15; // LTE-M.
7 static const int McsToItbsDl[16] = { 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,
8         8, 9, 9, 10, 11, 12, 13, 14};
9 static const int McsToItbsUl[16] = { 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,
10        8, 9, 10, 10, 11, 12, 13, 14};
11 static const int TransportBlockSizeTable [6][15] = {
12 /* NPRB 001*/ { 16, 24, 32, 40, 56, 72, 88, 104, 120, 136, 144,
13         176, 208, 224, 256},
14 /* NPRB 002*/ { 32, 56, 72, 104, 120, 144, 176, 224, 256, 296,
15         328, 376, 440, 488, 552},
16 /* NPRB 003*/ { 56, 88, 144, 176, 208, 224, 256, 328, 392, 456,
17         504, 584, 680, 744, 840},
18 /* NPRB 004*/ { 88, 144, 176, 208, 256, 328, 392, 472, 536, 616,
19         680, 776, 904, 1000, 1128},
20 /* NPRB 005*/ { 120, 176, 208, 256, 328, 424, 504, 584, 680, 776,
21         872, 1000, 1128, 1256, 1416},
22 /* NPRB 006*/ { 152, 208, 256, 328, 408, 504, 600, 712, 808, 936,
23         1032, 1192, 1352, 1544, 1736}};

```

Výpis 5.5: Úprava kódu lte-amc.cc.

## 5.2.4 Implementace PSM a eDRX

Již dříve bylo stanoveno, že technologie LPWA by měly být energeticky úsporné a zajišťovat funkčnost zařízení po dobu několika let. Od verze 12 technologie LTE Cat M získala Power-Saving Mod (PSM) a později jej rozšířila o Extended Discontinuous Reception (eDRX). Ve svém jádru jsou tyto režimy nezbytné pro snížení spotřeby energie zařízení tím, že minimalizují aktivní dobu vysílače a přijímače. To však zase zvyšuje latenci a snižuje propustnost [16].

Kombinace těchto režimů pomáhá udržovat rovnováhu mezi dostupností zařízení a úsporou energie. Když je zapnuta funkce eDRX, zařízení LTE-M místo nepřetržitého sledování řídicího kanálu používají k poslechu vysílání DL stránkování. Frekvence stránkování je určena cyklem eDRX, který lze nakonfigurovat na maximální dobu 175 minut. Po uplynutí této doby přejde jednotka do režimu PSM, ve kterém se téměř úplně vypne, aby se šetřila energie, a ponechá aktivní pouze hodiny pro sledování času. Doba provozu PSM je řízena časovačem T3412, známým také jako časovač periodické Tracking Area Updates (TAU), který určuje periodickou aktualizaci sledovací oblasti [16].

Změny pro režimy PSM a eDRX byly importovány z modulu LENA-NB. Po důkladné analýze se ukázalo, že modul pro odhad energie je také založen na modulu LENA, S ohledem na to byl skript upraven tak, aby implementoval PSM a eDRX pro LTE-M. V rámci předchozích kroků již byly řídicí zprávy aktualizovány a přizpůsobeny specifikaci verze 13. Další práce vyžaduje implementaci časovače PSM T3412, časovače eDRX T3324, časovače uvolnění RRC a smyčky eDRX.

Tyto časovače jsou definovány ve třídách *LteUeRrc* a *LteEnbRrc* a jsou volány pomocí funkce `AddAttribute`. Soubor *lte-helper.cc* byl také aktualizován tak, aby definoval časovače ve scénáři při instalaci zařízení *LteNetDevice*. Výpis 5.6 ukazuje definice časovačů v souboru *lte-enb-rrc.cc*. Podobné změny byly provedeny i v souboru *lte-ue-rrc.cc*.

```

1 .AddAttribute ("T3324",
2     "Timer for the T3324 ",
3     IntegerValue ( (0)),
4     MakeIntegerAccessor (&LteEnbRrc::m_t3324_d),
5     MakeIntegerChecker<int32_t> ())
6 .AddAttribute ("T3412",
7     "Timer for the T3412 ",
8     IntegerValue ( (10000)),
9     MakeIntegerAccessor (&LteEnbRrc::m_t3412_d),
10    MakeIntegerChecker<int64_t> ())
11 .AddAttribute ("TeDRXC",
12    "Timer for the TeDRXC ",
13    IntegerValue ( (0)),
14    MakeIntegerAccessor (&LteEnbRrc::m_edrx_cycle_d),
15    MakeIntegerChecker<int32_t> ())
16 .AddAttribute ("RrcReleaseInterval",
17    "Rrc Release Interval in ms",
18    UIntegerValue(10000),
19    MakeUIntegerAccessor (&LteEnbRrc::m_rrcreleaseinterval_d),
20    MakeUIntegerChecker<uint16_t> (0, 60000) )
21 .AddAttribute ("EnablePSM",
22    "If true, PSM will be enabled.",
23    BooleanValue (true),
24    MakeBooleanAccessor (&LteEnbRrc::m_enablePSM_d),
25    MakeBooleanChecker ())

```

Výpis 5.6: Úprava kódu *lte-enb-rrc.cc*.

Nové stavy sítě pro UE byly definovány v souboru *lte-ue-rrc.cc*, jak je uvedeno v výpisu 5.7. Byly také přidány další stavy *EDRX\_PAGING* a *EDRX\_IDLE*, protože v klidovém stavu zařízení spotřebovává mnohonásobně méně energie než v režimu vyhledávání. Byl také přidán stav *CONNECTED\_TAU* pro přenos TAU, aby bylo zajištěno správné chování modulu po vypršení časovače T3412. Tento režim zajiš-

tuje správný průběh přechodu UE po opuštění režimu PSM. Po přechodu do stavu *CONNECTED\_TAU* přejde UE do režimu eDRX pro příjem pagingu ze sítě.

```
1 static const std::string g_ueRrcStateName[LteUeRrc::NUM_STATES] = {
2     "IDLE_START",
3     "IDLE_CELL_SEARCH",
4     "IDLE_WAIT_MIB_SIB1",
5     "IDLE_WAIT_MIB",
6     "IDLE_WAIT_SIB1",
7     "IDLE_CAMPED_NORMALLY",
8     "IDLE_WAIT_SIB2",
9     "IDLE_PAGING", //new
10    "IDLE_RANDOM_ACCESS",
11    "IDLE_CONNECTING",
12    "CONNECTED_NORMALLY",
13    "CONNECTED_HANOVER",
14    "CONNECTED_PHY_PROBLEM",
15    "CONNECTED_REESTABLISHING",
16    "EDRX_IDLE", //new
17    "EDRX_PAGING", //new
18    "PSM_SLEEP", //new
19    "CONNECTED_TAU" //new
20 };
```

Výpis 5.7: Úprava kódu lte-ue-rrc.cc.

Podobně jako u UE jsou do souboru *lte-enb-rrc.cc* přidány nové stavy pro implementaci PSM a eDRX na straně základnové stanice. Jsou zde definovány dva nové stavy, a to *CONNECTION\_EDRX* a *CONNECTION\_PSM*. Tyto změny se odrážejí ve výpisu 5.8.

```
1 static const std::string g_ueManagerStateName[UeManager::NUM_STATES
2 ] = {
3     "INITIAL_RANDOM_ACCESS",
4     "CONNECTION_SETUP",
5     "CONNECTION_REJECTED",
6     "ATTACH_REQUEST",
7     "CONNECTED_NORMALLY",
8     "CONNECTION_RECONFIGURATION",
9     "CONNECTION_REESTABLISHMENT",
10    "HANDOVER_PREPARATION",
11    "HANDOVER_JOINING",
12    "HANDOVER_PATH_SWITCH",
13    "HANDOVER_LEAVING",
14    "CONNECTION_EDRX", // new
15    "CONNECTION_PSM", // new
16 };
```

Výpis 5.8: Úprava kódu lte-enb-rrc.cc.

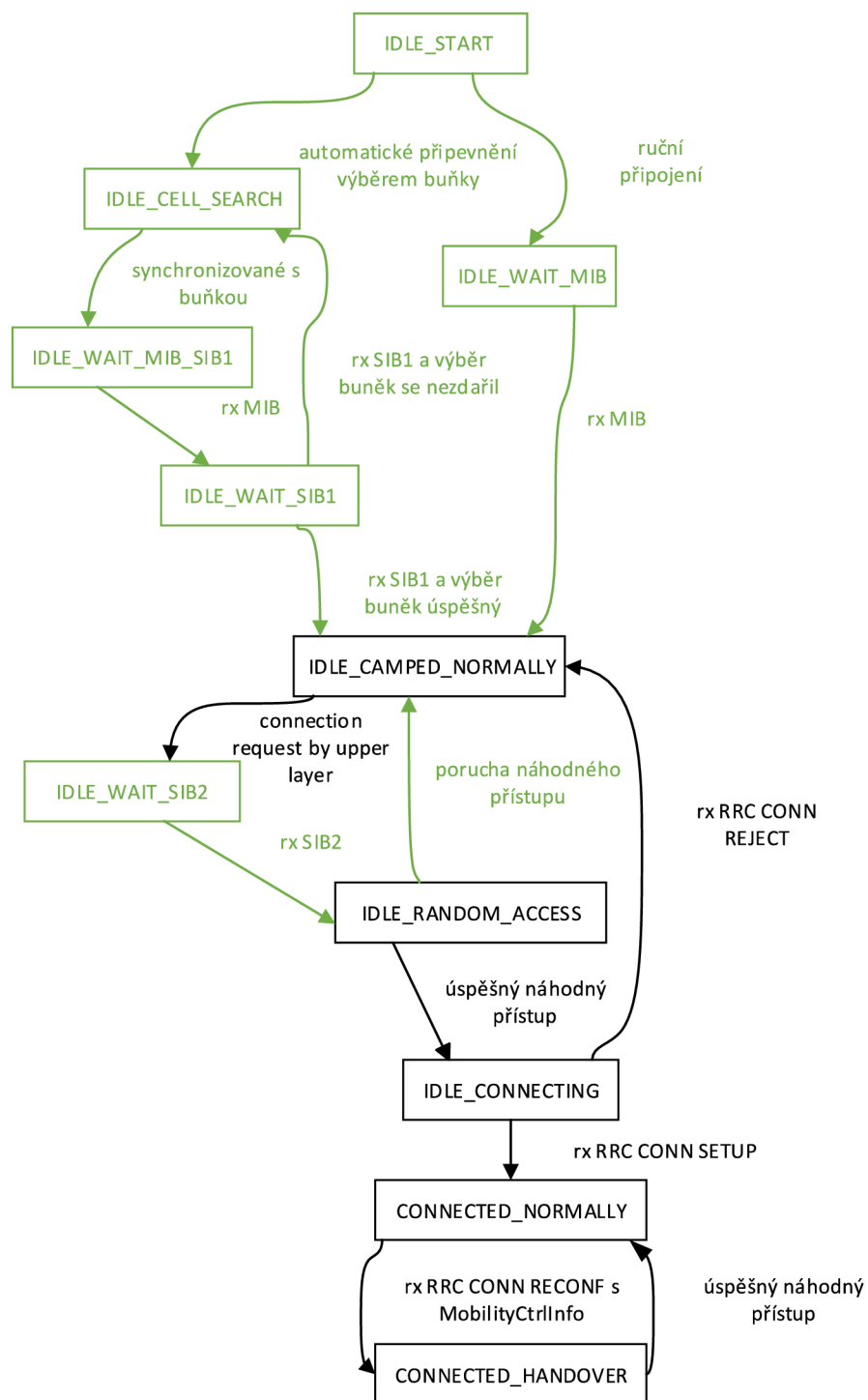
Tyto stavy jsou řízeny funkcemi SwitchToState a DoSetFrameSubframe. Právě jejich změny ve výpisu 5.9 vedou ke správnému přepínání režimů.

```
1 void
2 LteUeRrc::SwitchToState(State newState)
3 {
4     ...
5     switch (oldState)
6     {
7         case CONNECTED_NORMALLY:
8             //TODO: Update from rrc reconfiguration
9             m_t3324 = m_t3324_d;
10            m_t3412 = m_t3412_d;
11            m_edrx_cycle = ((m_edrx_cycle_d));
12            ...
13            case CONNECTED_TAU:
14                trigger = MakeCallback(&EnergyModuleLtem::
15                Only_tau_decrease, &LEM);
16                trigger(0);
17                break;
18            default:
19                break;
20        }
21        ...
22        case EDRX_PAGING:
23            if(true == m_hasReceivedPaging)
24            {
25                SwitchToState(CONNECTED_NORMALLY);
26
27                LteRrcSap::RrcConnectionReconfigurationCompleted msg;
28                msg.rrcTransactionIdentifier =
29                m_lastRrcTransactionIdentifier;
30                m_rrcSapUser->
31                SendRrcConnectionReconfigurationCompleted (msg);
32            }
33            ...
34    }
```

Výpis 5.9: Úprava kódu lte-ue-rrc.cc.

## 5.2.5 Uvolnění RRC

V poslední podkapitole 5.2.2 a 5.2.4 již byla zmíněna problematika řízení stavů RRC. V modulu LENA jsou tyto stavy popsány v souborech *lte-enb-rrc.cc* a *lte-ue-rrc.cc*. Obrázek 5.6 znázorňuje model chování stavů v NS-3.



Obr. 5.6: Definice stavů RRC pro UE v NS-3 [27].

Po registraci zařízení do sítě a navázání spojení RRC se v první sekundě začnou přenášet data. Po dokončení přenosu však zůstává zásuvka aktivní a spojení RRC není ukončeno, dokud není dokončena modulace.

Fáze úspěšného spojení v NS-3 je stav RRC *CONNECTED\_NORMALLY* a poté se přechází do stavu RRC *IDLE\_CAMPED\_NORMALLY*, protože první fáze obsazuje dostupné zdroje základnové stanice až do konce simulace. Proto je nutné implementovat metody pro ruční odpojování zařízení od základnové stanice a jejich připojování.

V této práci bohužel nebylo možné kombinovat ruční přepínání s režimy PSM kvůli chybě v přenosu správných stavů Radio Network Temporary Identifier (RNTI). Tyto změny by však měly pomoci zařízením UE učinit správné rozhodnutí o jejich připojení a odpojení od základnové stanice, což je důležité pro efektivní fungování modelování sítě LTE Cat-M, které umožňuje lepší kontrolu zdrojů základnové stanice.

### 5.2.6 Úprava parametrů scénáře

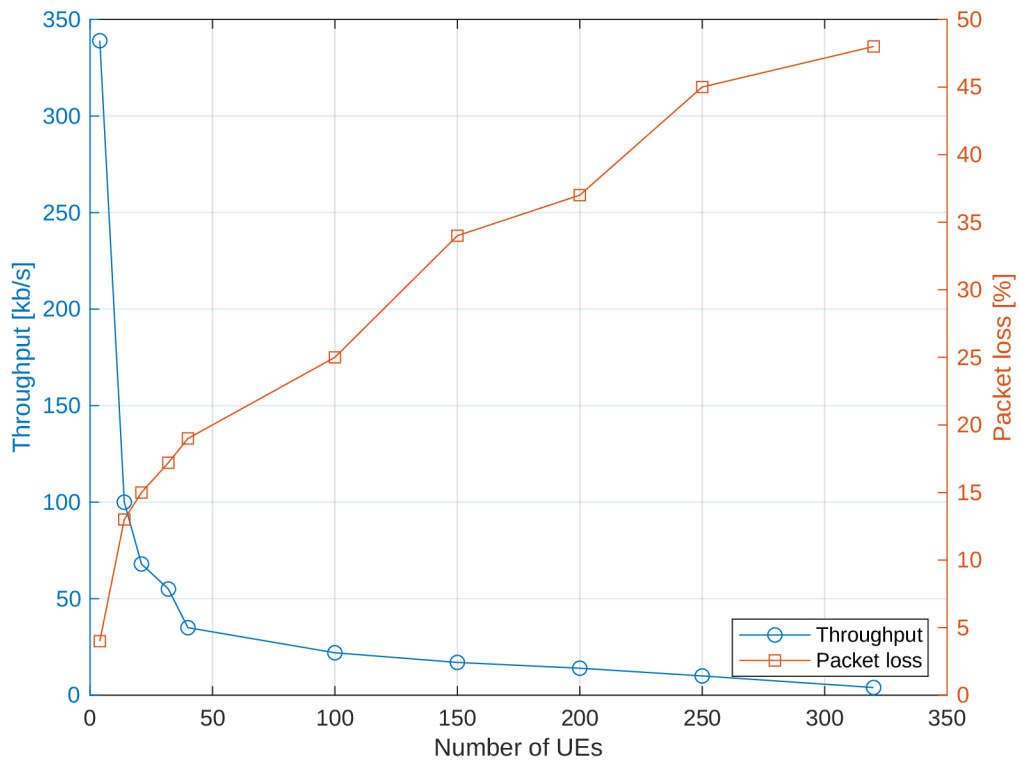
Parametry LTE Cat-M použité při simulaci jsou uvedeny ve výpisu 5.10. Šířka pásma je nastavena na 6 PRB, což odpovídá šířce pásma 1,4 MHz typické pro LTE Cat-M1. Úroveň šumu byla rovněž nastavena na 9 a 5 decibelů pro UE a základnovou stanici. Jako kmitočtové pásmo pro simulaci bylo zvoleno pásmo 8, protože je to neoptimálnější pásmo pro provoz LTE-M. Vysílací výkon základnové stanice byl nastaven na 46 dBm a UE na 23 dBm.

```
1 Config::SetDefault("ns3::LteEnbRrc::SrsPeriodicity", UintegerValue
    (320));
2 Config::SetDefault("ns3::LteUePhy::NoiseFigure", StringValue("9"));
3 Config::SetDefault("ns3::LteEnbPhy::NoiseFigure", StringValue("5"))
    ;
4
5 Config::SetDefault("ns3::LteUePhy::TxPower", DoubleValue(23.0)); //
    Tx power of UE 23dBm
6 Config::SetDefault("ns3::LteEnbPhy::TxPower", DoubleValue(46.0));
    // Tx power of eNB 46dBm
7
8 lteHelper->SetEnbDeviceAttribute("DlBandwidth", UintegerValue(6));
9 lteHelper->SetEnbDeviceAttribute("UlBandwidth", UintegerValue(6));
```

Výpis 5.10: Úprava kódu lte-ue-rrc.cc.

## 5.3 Vyhodnocení modelování

V této části jsou uvedeny výsledky simulace po provedení všech změn pro scénář, který se blíží skutečným podmínkám a splňuje normy mMTC. V konečném scénáři dosáhl počet podporovaných zařízení bez přetížení sítě 324 UE v jedné síti při maximální rychlosti 4 kb/s.

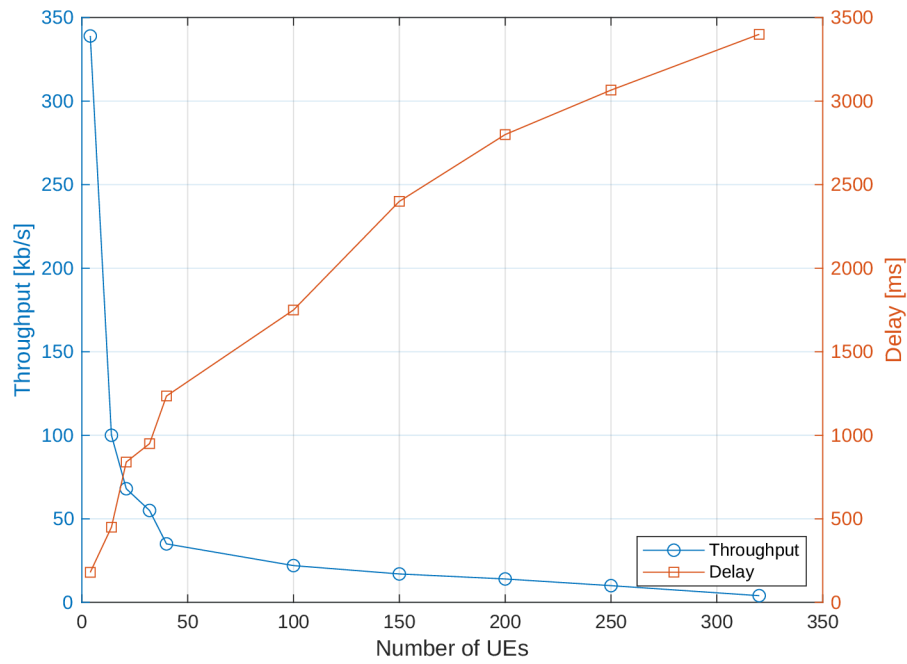


Obr. 5.7: Ztráta paketů při přenosu dat v kanálu směrem nahoru.

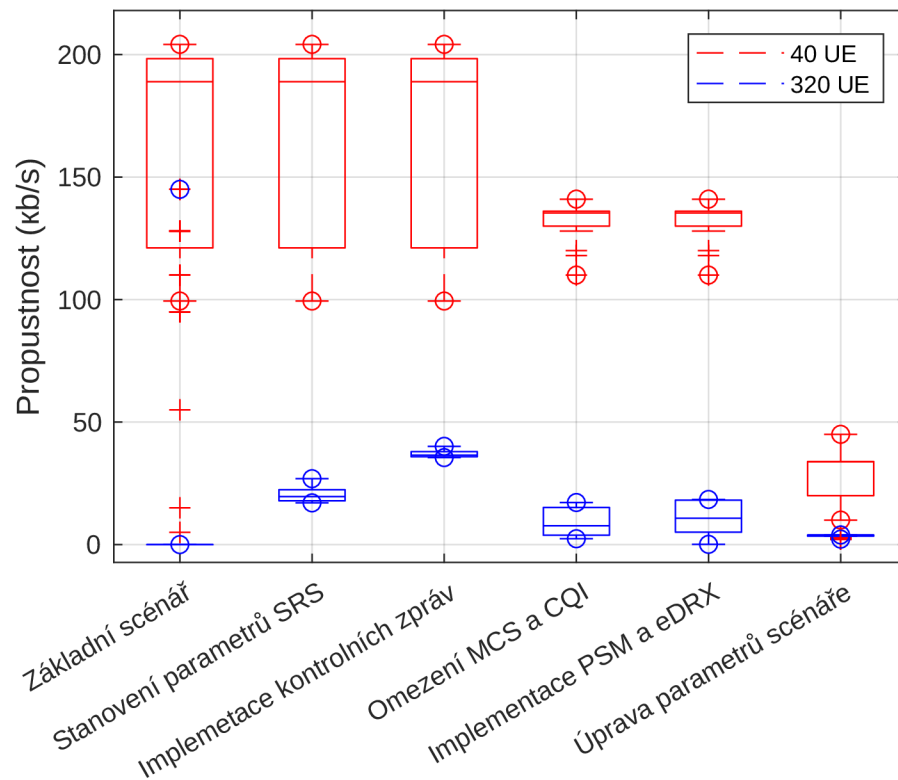
Na obrázcích 5.7 a 5.8 je zobrazen graf poměru propustnosti, zpoždění a ztráty paketů k počtu zařízení. Z grafu vyplývá, že maximální rychlost dosažená s 320 zařízeními je vyšší než 2 kb/s při použití režimů PSM a eDRX. Ztráta paketů dosáhla při maximálním počtu zařízení až 48%.

Grafy ukazují, jak latence a ztráta paketů postupně roste s rostoucím počtem zařízení v síti připojených k jedné základnové stanici. Síť však zůstává i nadále stabilní bez přetížení v uplinku.

Obrázek 5.9 ukazuje klíčové změny projektu ve vztahu k propustnosti. Klíčovými úpravami pro síť jsou změny parametru SRS, které usnadňují růst počtu zařízení v síti. Také zavedení režimů PSM a eDRX, které zvyšují latenci, ale zajišťují plynulejší přepínání mezi stavy.



Obr. 5.8: Zpoždění při přenosu dat v kanálu směrem nahoru.



Obr. 5.9: Poměr propustnosti ze všech modifikací.



# Závěr

Diplomová práce zkoumala dopad technologie Low-Power Wide-Area (LPWA) na scénáře internetu věcí s ohledem na rostoucí počet připojených zařízení. První kapitola se zabývá konceptem internetu věcí a jeho dopadem na život lidí, propojením Machine-to-Machine (M2M) a rolí, kterou hraje vývoj a standardizace komunikačních protokolů The 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

Druhá kapitola se podrobně zabývá technologiemi LPWA. Zejména jsou popsány technologie využívající bezlicenční frekvenční pásmo - Sigfox a Long-Range Wide-Area Network (LoRaWAN) - a dále technologie pracující v licencovaném frekvenčním pásmu Long-Term Evolution Machine Type Communication (LTE Cat-M) a NarrowBand IoT (NB-IoT).

Třetí kapitola pojednává o technologii LTE Cat-M, představuje scénáře využití této technologie a popisuje principy fungování. Je popsána fyzická vrstva dané technologie, včetně spojů a signalizace pro Uplink a Downlink. Zabývá se také evolucí technologie LTE Cat-M ve světle nových verzí 3GPP. Další kapitola je věnována modelovacímu nástroji Network Simulator 3 (NS-3) a komunikačním modulům představujícím různé scénáře. Pro tuto studii byl vybrán modul LTE/EPC Network Simulator (LENA), který reprezentuje funkce Long Term Evolution (LTE) v prostředí NS-3.

Pátá kapitola definuje klíčové parametry pro testování scénáře závislosti přetížení na počtu připojených zařízení. V podkapitole 5.1 je nastíněn základní scénář pro massive Machine Type Communication (mMTC). Výsledky poukazují na omezení technologie LTE, zejména při použití normy 3GPP Rel. 10. Při připojení velkého počtu zařízení k jedné základnové stanici se snižuje rychlost přenosu dat, zvyšuje se latence a roste úroveň ztráty dat v důsledku opakovaných přenosů. Dokonce i v referenčním scénáři se 40 zařízeními dosáhne systém svého kapacitního limitu, což zdůrazňuje potřebu efektivnějších řešení pro scénáře mMTC.

Proto byly dále v podkapitole 5.2 nastíněny klíčové změny modulu LENA, které mají zajistit efektivní využití pásma spektra LTE pro mMTC. Díky tomu je LTE Cat-M zajímavou volbou pro scénáře internetu věcí. Jednou z prvních změn bylo zvýšení SRS, které umožňuje jedné základnové stanici obsluhovat až 320 zařízení najednou. Pro plnou realizaci LTE Cat-M však bylo podle verze 13 nutné provést ještě několik dalších úprav. To vyžadovalo implementaci funkcí úspory energie PSM a eDRX, které jsou zavedeny v modulu LENA-NB. Cílem těchto úprav bylo integrovat do standardu LTE Cat-M funkce pro úsporu energie, aby byla zajištěna dlouhá výdrž baterií zařízení internetu věcí. Bylo také nutné implementovat řadiče zpráv LTE Cat-M Master Information Block (MIB) a System Information Block (SIB) podle standardu verze 13. Třídy LteUeRrc a LteEnbRrc musely být také upraveny

tak, aby zvládaly nové stavy a řídicí časovače. A modulační schéma bylo změněno na modulaci Quadrature Amplitude Modulation-16 (QAM-16). A nakonec byl opraven samotný scénář, aby se simulace přiblížila reálné síti. Tyto změny modulu LENA pomohou dosáhnout potřebných požadavků na komunikaci ve scénářích mMTC podle technologie LTE Cat-M.

V poslední podkapitole 5.3 jsou uvedeny grafy zobrazující všechny úpravy. Výsledky ukazují, že síť je nyní schopna zpracovávat stovky zařízení najednou se stabilními údaji. Bylo možné dosáhnout připojení 320 zařízení k jedné základnové stanici s propustností několika kilobajtů a ztrátou paketů menší než 50%. Při použití režimů Power Saving Mode (PSM) a extended Discontinuous Reception (eDRX) mohou být tato zařízení plně autonomní po dobu několika let. Tento scénář proto může být vynikajícím příkladem tam, kde bude zapotřebí obrovské množství koncových zařízení, mezi jejichž úkoly může patřit sběr fyzických dat z prostředí, jako jsou inteligentní skleníky nebo města.

# Literatura

- [1] Kyle Benson, Charles Fracchia, Guoxi Wang, Qiuxi Zhu, Serene Almomen, John Cohn, Luke D'arcy, Daniel Hoffman, Matthew Makai, Julien Stamatakis, et al. Scale: Safe Community Awareness and Alerting Leveraging the Internet Of Things. *IEEE Communications Magazine*, 53(12):27–34, 2015.
- [2] Vitaly Petrov, Andrey Samuylov, Vyacheslav Begishev, Dmitri Moltchanov, Sergey Andreev, Konstantin Samouylov, and Yevgeni Koucheryavy. Vehicle-based Relay Assistance for Opportunistic Crowdsensing Over Narrowband IoT (NB-IoT). *IEEE Internet of Things journal*, 5(5):3710–3723, 2017.
- [3] Olof Liberg, Marten Sundberg, Eric Wang, Johan Bergman, and Joachim Sachs. *Cellular Internet of Things: Technologies, Standards, and Performance*. Academic Press, 2017.
- [4] Xiong Xiong, Kan Zheng, Rongtao Xu, Wei Xiang, and Periklis Chatzimisios. Low Power Wide Area Machine-to-machine Networks: Key Techniques and Prototype. *IEEE Communications Magazine*, 53(9):64–71, 2015.
- [5] Abigail Opiah. The 5G and IoT Revolution, Apr 2020. URL: <https://rb.gy/yo2m4s>.
- [6] Mikio Iwamura. NGMN View On 5G Architecture. In *2015 IEEE 81st vehicular technology conference (VTC Spring)*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [7] Radio Regulations. Radio Regulations. Technical report, R-REG-RR, 2016.
- [8] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand 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)*, pages 197–202. IEEE, 2018.
- [9] Satish Chalapati. Comparison Of LPWA Technologies And Realizable Use Cases, 2018. URL: <http://surl.li/ttuzh>.
- [10] Luiz Oliveira, Joel JPC Rodrigues, Sergei A Kozlov, Ricardo AL Rabêlo, and Victor Hugo C de Albuquerque. Mac layer protocols for internet of things: A survey. *Future Internet*, 11(1):16, 2019.
- [11] Wael Ayoub, Abed Ellatif Samhat, Fabienne Nouvel, Mohamad Mroue, and Jean-Christophe Prévotet. Internet of Mobile Things: Overview of Lorawan, Dash7, and Nb-iot in Lpwans Standards and Supported Mobility. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(2):1561–1581, 2018.

- [12] LoRa Alliance. Lorawan, Nov 2022. URL: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.
- [13] 3GPP. A Global Partnership Releases, Dec 2020. URL: <https://www.3gpp.org/specifications/67-releases>.
- [14] 3GPP. Study on Provision of Low-cost Machine-type Communications (MTC) User Equipments (UEs) Based on LTE, 2013.
- [15] Mohammed Y Abdelsadek, Yasser Gadallah, and Mohamed H Ahmed. A Critical MTC Resource Allocation Approach for LTE Networks with Finite Blocklength Codes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(5):5598–5609, 2020.
- [16] Bharat S Chaudhari and Marco Zennaro. *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Academic Press, 2020.
- [17] GSM Association et al. LTE-M Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements, 2018.
- [18] Ahmed El Mahjoubi, Tomader Mazri, and Nabil Hmina. NB-IoT and EMTC: Engineering Results Towards 5G/IoT Mobile Technologies. In *2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISA-ECT)*, pages 1–7. IEEE, 2018.
- [19] 5G Americas. 3gpp releases 16, 17 and beyond, Jan 2021. URL: <https://www.5gamericas.org/3gpp-releases-16-17-beyond/>.
- [20] Ericsson White Paper. RedCap: Expanding the 5G Device Ecosystem - Ericsson, Feb 2023. URL: <https://rb.gy/53hpjp>.
- [21] Patel Rajankumar, Patel Nimisha, and Pariza Kamboj. A Comparative Study and Simulation of AODV MANET Routing Protocol in NS2 & NS3. In *2014 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, pages 889–894. IEEE, 2014.
- [22] Konsorcium NS-3. NS-3 Manual, Jan 2019. URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.29/manual/ns-3-manual.pdf>.
- [23] NS-3. 19.1. Design Documentation - Model Library. URL: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html>.
- [24] NR-U. 5G-LENA NR-U Extension Module, Dec 2023. URL: <https://cttc-lena.gitlab.io/nr-u/>.

- [25] Pascal Jörke, Tim Gebauer, and Christian Wietfeld. From LENA to LENA-NB: Implementation and Performance Evaluation of NB-IoT and Early Data Transmission in NS-3. In *Proceedings of the 2022 Workshop on ns-3*, pages 73–80, 2022.
- [26] Physical Layer Procedures. Lte; evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical layer procedures. *Specs/archive/36\_series/36.213*, 2020.
- [27] Budiarto Herman, Nicola Baldo, Marco Miozzo, Manuel Requena, and Jaime Ferragut. Extensions to lte mobility functions for ns-3. In *Proceedings of the 2014 Workshop on ns-3*, pages 1–8, 2014.

# Seznam symbolů a zkratek

<b>3GPP</b>	Third Generation Partnership Project
<b>4G</b>	4th Generation
<b>5G-LENA</b>	5th Generation LTE/EPC Network Simulator
<b>ADR</b>	Adaptive Data Rate
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard
<b>CCTC</b>	Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya
<b>CE</b>	Coverage Enhancement
<b>CT</b>	Core Network and Terminals
<b>cMTC</b>	Critical Machine Type Communication
<b>DBPSK</b>	Differential Binary Phase-Shift Keying
<b>E2E</b>	End-to-End
<b>eDRX</b>	extended Discontinuous Reception
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>eMTC</b>	enhanced Machine Type Communication
<b>eNB</b>	eUTRAN Node Base
<b>eUTRAN</b>	Evolved Universal Terrestrial Access Network
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FDD</b>	Frequency-Division Duplex
<b>GFSK</b>	Gaussian Frequency Shift Keying
<b>GERAN</b>	GSM/EDGE Radio Access Network
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communication
<b>H2H</b>	Human-to-Human
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat Request

<b>HMAC</b>	Hash-based Message Authentication Code
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>LENA</b>	LTE/EPC Network Simulator
<b>LENA-NB</b>	LTE/EPC Network Simulator NarrowBand
<b>LPWA</b>	Low-Power Wide-Area
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LTE Cat-M</b>	Long-Term Evolution Machine Type Communication
<b>LoRa</b>	Long Range
<b>LoRaWAN</b>	Long-Range Wide-Area Network
<b>M2M</b>	Machine-to-Machine
<b>MAC</b>	Medium Access Layer
<b>MIB</b>	Master Information Block
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>mMTC</b>	massive Machine-Type Communications
<b>MPDCCH</b>	MTC Physical Downlink Control Channel
<b>NB-IoT</b>	Narrowband IoT
<b>NS-3</b>	Network Simulator 3
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>PCFICH</b>	Physical Control Format Indicator Channel
<b>PCG</b>	Project Co-ordination Group
<b>PAC</b>	Porting Authorisation Code
<b>PBCH</b>	Physical Broadcast Channel
<b>PDN</b>	Packet Data Network
<b>PDCP</b>	Packet Data Convergence Control
<b>PDSCH</b>	Physical Downlink Shared Channel

<b>PGW</b>	Packet data network Gateway
<b>PHICH</b>	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PRACH</b>	Physical Random Access Channel
<b>PRB</b>	Physical Resource Blocks
<b>PSM</b>	Power Saving Mode
<b>PSS</b>	Primary Synchronization Signal
<b>PUCCH</b>	Physical Uplink Control Channe
<b>PUSCH</b>	Physical Uplink Shared Channel
<b>QAM-16</b>	Quadrature Amplitude Modulation-16
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying
<b>RAN</b>	Radio Access Network
<b>RE</b>	Resource Element
<b>RLC</b>	Radio Link Control
<b>RRC</b>	Radio Resource Control
<b>RS</b>	Reference signal
<b>SA</b>	Service and System Aspects
<b>SC-FDMA</b>	Single-Carrier FDMA
<b>SCEF</b>	Service Capability Exposure Function
<b>SGW</b>	Serving Gateway
<b>SIB</b>	System Information Block
<b>SIM</b>	Universal Subscriber Identity Module
<b>SSS</b>	Secondary Synchronization Signal
<b>TDD</b>	Time-Division Duplex



<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TSG</b>	Technical Specification Groups
<b>UE</b>	User Equipment
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>UNB</b>	Ultra-Narrow Band
<b>URLLC</b>	Ultra-Reliable and Low Latency Communication
<b>VoLTE</b>	Voice over LTE
<b>WAN</b>	Wide-Area Network

# A Obsah elektronické přílohy

Obsah e-přílohy je uveden v níže uvedené struktuře. Elektronická příloha obsahuje všechny úpravy potřebné ke spuštění scénáře, včetně hlavního kódu.

NS-3.41 .....	kořenový adresář příloženého archivu
├── lte .....	Modifikace modulu LENA
│   ├── energy-module-ltem.cc	
│   ├── energy-module-ltem.h	
│   ├── lte-amc.cc	
│   ├── lte-control-messages.cc	
│   ├── lte-control-messages.h	
│   ├── lte-enb-cphy-sap.h	
│   ├── lte-enb-phy.cc	
│   ├── lte-enb-phy.h	
│   ├── lte-enb-rrc.cc	
│   ├── lte-enb-rrc.h	
│   ├── lte-full.cc	
│   ├── lte-phy.cc	
│   ├── lte-rrc-protocol-ideal.cc	
│   ├── lte-rrc-protocol-ideal.h	
│   ├── lte-rrc-protocol-real.cc	
│   ├── lte-rrc-protocol-real.h	
│   ├── lte-rrc-sap.h	
│   ├── lte-ue-cphy-sap.h	
│   ├── lte-ue-phy.cc	
│   ├── lte-ue-phy.h	
│   ├── lte-ue-rrc.cc	
│   ├── lte-ue-rrc.h	
│   ├── M1-ff-mac-common.cc	
│   ├── M1-ff-mac-common.h	
│   ├── M1-lte-rrc-sap.cc	
│   ├── M1-lte-rrc-sap.h	
├── helper .....	Úprava helper
│   ├── lte-helper.h	
│   └── lte-helper.cc	
├── scratch .....	Zdrojové soubory
│   ├── lte-full.cc	
│   └── energy .....	Modifikace energy moduly
│       ├── li-ion-energy-source.h	
│       └── li-ion-energy-source.cc	