



# 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

## TESTOVACÍ PLATFORMA PRO OVĚŘENÍ KOMUNIKAČNÍCH MODULŮ V RÁMCI PRŮMYSLOVÉHO INTERNETU VĚCÍ

UNIVERSAL TESTER FOR VERIFYING INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS COMMUNICATION MODULES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Martin Fabulec**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Pavel Mašek, Ph.D.**

**BRNO 2024**



# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Martin Fabulec

**ID:** 220887

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Testovací platforma pro ověření komunikačních modulů v rámci průmyslového Internetu věcí

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem diplomové práce bude nastudovat problematiku bezdrátového přenosu dat v rámci průmyslového Internetu věcí. Teoretická část práce bude obsahovat podrobnou studii a porovnání aktuálně dostupných komunikačních modulů pro technologie Narrowband IoT (NB-IoT) a LTE Cat-M. Následně budou vybrány komunikační moduly, pro které bude navržena testovací platforma, tj., deska plošného spoje s rozhraním miniPCIe či M.2. Praktická část práce bude obsahovat realizaci HW, implementaci FW/SW a následné ověření funkčnosti vybraných modulů. Testování se bude skládat ze série měření jak v laboratorním prostředí (laboratoř UniLab), tak v reálných lokalitách, a to se zaměřením na hraniční rádiové podmínky. Výsledky práce budou následně zpracovány a přehledně prezentovány.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] CHAUDHARI, Bharat S. a Marco ZENNARO, 2020. LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications. Online: Academic Press.

[2] LIBERG, Olof, Maarten 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**

Diplomová práca sa venuje overeniu platformy pre testovanie komunikačných modulov v kontexte priemyselného Internetu vecí (IoT). Cieľom je poskytnúť hĺbkovú analýzu a porovnanie moderných komunikačných technológií Narrowband IoT (NB-IoT) a (LTE Cat-M), a určiť ich využitie v rôznych scenároch IoT. Popísané sú ich spoločné a taktiež odlišné parametre. Práca zahŕňa podrobné skúmanie a hodnotenie dostupných komunikačných modulov, kde sa kládol dôraz hlavne na ich kľúčové parametre a rozdiely. Práca sa taktiež zameriava na praktické aspekty implementácie a testovania týchto technológií, návrhu modulu BC660K-GL a jeho následného overenia funkčnosti. Po overení funkčnosti bol podrobený meraniam zameraným na hraničné rádiové podmienky. Diplomová práca otvára dvere k lepšiemu porozumeniu a využívaniu IoT technológií v priemysle a skúma aké výzvy a príležitosti prináša ich rýchly rozvoj.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

3GPP, AT, celulárny IoT, DPS, eDRX, Internet vecí, LTE Cat-M, masívna komunikácia strojového typu, PSM, úzkopásmový IoT

## **ABSTRACT**

The Master thesis is devoted to the verification of a platform for testing communication modules in the context of the Industrial Internet of Things (IoT). The aim is to provide an indepth analysis and comparison of modern Narrowband IoT (NB-IoT) and (LTECat-M), and determine their use in different IoT scenarios. Their commonalities are described as well as different parameters. The work includes a detailed investigation and evaluation of the available communnification modules, where the main focus is on their key parameters and differences. The thesis also focuses on the practical aspects of implementing and testing these technologies, the design of the BC660K-GL module and its subsequent functional verification. After functional verification, it was subjected to measurements focused on radio boundary conditions. The thesis opens the door to a better understanding and use of IoT technologies in industry and explores the challenges and opportunities presented by their rapid development.

## **KEYWORDS**

3GPP, AT, cellular IoT, DPS, eDRX, Internet of Things, LTE Cat-M, masive Machine Type Communication, narrowband IoT, PSM



FABULEC, Martin. *Platforma pro ověření komunikačních modulů v rámci průmyslového Internetu věcí*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedúci práce: Ing. Pavel Mašek, Ph.D.





## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Bc. Martin Fabulec

**VUT ID autora:** 220887

**Typ práce:** Diplomová práca

**Akademický rok:** 2023/24

**Téma záverečnej práce:** Platforma pro ověření komunikačních modulů v rámci průmyslového Internetu věcí

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej 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 záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej 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 trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.



## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Pavlovi Maškovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Taktiež by som chcel poďakovať pánovi Ing. Pavlovi Paluříkovi a pánovi Ing. Radimovi Dvořákovi za odborné konzultácie a podnetné návrhy k práci. Veľká vďaka patrí mojej rodine, ktorá ma nepretržite podporovala a dodávala mi potrebnú energiu.



# Obsah

Úvod	21
<b>1 Internet of Things</b>	<b>23</b>
1.1 Charakteristika Internet of Things . . . . .	23
1.2 Machine-Type Communication . . . . .	23
1.3 Fourth Industrial Revolution . . . . .	24
1.4 The 3rd Generation Partnership Project . . . . .	24
<b>2 Narrowband Internet of things</b>	<b>27</b>
2.1 Úvod . . . . .	27
2.2 Komunikačné scenáre . . . . .	28
2.3 Frekvenčné pásma . . . . .	29
2.4 Operačné módy . . . . .	30
2.5 Architektúra siete . . . . .	30
2.6 Šetriace režimy . . . . .	33
2.6.1 Power Saving Mode . . . . .	33
2.6.2 Extended Discontinuous Reception . . . . .	34
2.7 Definícia podľa 3GPP Vydania . . . . .	35
2.7.1 Definícia podľa 3GPP Vydanie 13 . . . . .	35
2.7.2 Definícia podľa 3GPP Vydanie 14 . . . . .	36
2.7.3 Definícia podľa 3GPP Vydanie 15 . . . . .	38
2.7.4 Definícia podľa 3GPP Vydanie 16 . . . . .	39
2.7.5 Definícia podľa 3GPP Vydanie 17 . . . . .	40
2.7.6 Definícia podľa 3GPP Vydanie 18 . . . . .	41
2.8 Bezpečnosť . . . . .	42
2.9 Privátne mobilné siete pre IoT . . . . .	47
2.9.1 Multi Operator Radio Access Network . . . . .	50
2.9.2 Multi Operator Core Network . . . . .	51
<b>3 Long Term Evolution Machine Type Communication</b>	<b>53</b>
3.1 Úvod . . . . .	53
3.2 Komunikačné scenáre . . . . .	54
3.3 Frekvenčné pásma . . . . .	55
3.4 Operačné módy . . . . .	56
3.5 Architektúra siete . . . . .	56
3.6 Šetriace režimy . . . . .	57

3.6.1	Power Saving Mode . . . . .	57
3.6.2	Extended Discontinuous Reception . . . . .	58
3.7	Definícia podľa 3GPP Vydania . . . . .	59
3.7.1	Definícia podľa 3GPP Vydanie 13 . . . . .	59
3.7.2	Definícia podľa 3GPP Vydanie 14 . . . . .	59
3.7.3	Definícia podľa 3GPP Vydanie 15 . . . . .	61
3.7.4	Definícia podľa 3GPP Vydanie 16 . . . . .	61
3.7.5	Definícia podľa 3GPP Vydanie 17 . . . . .	62
3.7.6	Definícia podľa 3GPP Vydanie 18 . . . . .	63
3.8	Bezpečnosť . . . . .	64
3.9	Porovnanie parametrov technológií NB-IoT a LTE-M . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Dostupné komunikačné moduly</b>	<b>69</b>
4.1	Modul BG77 . . . . .	69
4.1.1	Všeobecný popis . . . . .	69
4.1.2	Základné parametre . . . . .	71
4.1.3	Frekvenčné pásma . . . . .	72
4.1.4	Šetriace režimy . . . . .	72
4.2	Modul BC660K-GL . . . . .	73
4.2.1	Všeobecný popis . . . . .	73
4.2.2	Základné parametre . . . . .	73
4.2.3	Frekvenčné pásma . . . . .	75
4.2.4	Šetriace režimy . . . . .	75
4.3	Modul SIM7022 . . . . .	77
4.3.1	Všeobecný popis . . . . .	77
4.3.2	Základné parametre . . . . .	78
4.3.3	Frekvenčné pásma . . . . .	79
4.3.4	Šetriace režimy . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Návrh schémy a DPS modulu BC660K-GL</b>	<b>81</b>
5.1	Zapojenie MCU . . . . .	81
5.2	Zapojenie BC660K-GL . . . . .	82
5.3	Zapojenie anténnej časti . . . . .	83
5.4	Zapojenie MicroSD . . . . .	83
5.5	Zapojenie signalizačnej časti . . . . .	84
5.5.1	BC660K RESET N . . . . .	85
5.5.2	BC660K NETLIGHT . . . . .	85
5.5.3	BC660K PWR LED . . . . .	85

5.6	Zapojenie PWRKEY + PWRKEY Button . . . . .	86
5.6.1	Zapojenie Wake Up časti . . . . .	86
5.6.2	Zapojenie napájania . . . . .	87
5.7	Návrh dosky plošných spojov . . . . .	88
5.7.1	Overenie funkčnosti zariadenia . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Meranie hraničných rádiových podmienok</b>	<b>93</b>
6.1	Meranie prenosových rýchlostí . . . . .	105
	<b>Záver</b>	<b>109</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>111</b>
	<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>117</b>
	<b>Zoznam príloh</b>	<b>123</b>
A	Technická dokumentácia - Schéma	125
B	Technická dokumentácia - DPS	127
C	Technická dokumentácia - 3D DPS	129
D	Zoznam súčiastok z programu Altium Designer	131
E	Obsah elektronickej prílohy	133





# Zoznam obrázkov

1.1	Logo štandardizačnej skupiny 3GPP . . . . .	25
2.1	Logo technológie NB-IoT . . . . .	27
2.2	Operačné módy NB-IoT . . . . .	31
2.3	Schéma architektúry NB-IoT sieti . . . . .	33
2.4	Šetriaci režim PSM . . . . .	34
2.5	Šetriaci režim eDRX . . . . .	35
2.6	Bezpečnostné vlastnosti najmodernejších technológií LPWA . . . . .	46
2.7	Architektúra izolovanej MPN . . . . .	49
2.8	Vyhradená RAN vs. MOCN vs. MORAN . . . . .	52
3.1	Logo technológie LTE Cat-M . . . . .	54
3.2	Architektúra LTE-M . . . . .	57
3.3	Prehľad šetriacich režimov . . . . .	58
3.4	Prehľad vydaní . . . . .	67
4.1	Modul LPWAN BG77 . . . . .	70
4.2	Devkit modulu LPWAN BG77 . . . . .	70
4.3	Modul LPWA BC660K . . . . .	74
4.4	Devkit modulu LPWA BC660K . . . . .	75
4.5	Modul SIM7022 . . . . .	77
4.6	Devkit modulu SIM7022 . . . . .	78
5.1	Schéma MCU . . . . .	81
5.2	Zapojenie BC660K-GL . . . . .	82
5.3	Zapojenie anténnej časti . . . . .	83
5.4	Zapojenie MicroSD . . . . .	84
5.5	Zapojenie signalizácie . . . . .	85
5.6	Zapojenie PWRKEY + PWRKEY Button . . . . .	86
5.7	Zapojenie Wake Up časti . . . . .	87
5.8	Zapojenie napájania . . . . .	88
5.9	3D model návrhu prednej strany DPS . . . . .	89
5.10	3D model návrhu zadnej strany DPS . . . . .	89
5.11	Osadenie DPS . . . . .	89
6.1	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Purkyňové koleje . . . . .	94
6.2	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Purkyňove koleje . . . . .	95
6.3	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Technologický park . . . . .	96
6.4	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Technologický park . . . . .	97
6.5	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Česká . . . . .	98

6.6	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Česká	99
6.7	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Grohová	100
6.8	Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Grohová	101
6.9	BC660K-GL-TE B KIT. . . . .	102
6.10	Navrhnutý BC660K-GL. . . . .	102
6.11	Meranie RSRP a RSSI v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom	104
6.12	Meranie RSRQ a SINR v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom	104
6.13	Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom . . . . .	107
6.14	Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom . . . . .	108
6.15	Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom . . . . .	108
A.1	Návrh schémy . . . . .	125
B.1	DPS - vrstva TOP . . . . .	127
B.2	DPS - vrstva BOTTOM . . . . .	127
B.3	Osadenie súčiastok - vrstva TOP . . . . .	128
B.4	Osadenie súčiastok - vrstva BOTTOM . . . . .	128
C.1	3D DPS - vrstva TOP . . . . .	129
C.2	3D DPS - vrstva BOTTOM . . . . .	129

# Zoznam tabuliek

2.1	Frekvenčné pásma pre NB-IoT podľa dokumentu 3GPP Vydanie 13 . . .	30
2.2	Technické špecifikácie a vylepšenia pre NB-IoT Vydanie 13, 14 . . . . .	37
2.3	Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 15 . . . . .	38
2.4	Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 16 . . . . .	39
2.5	Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 17 . . . . .	40
2.6	Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 18 . . . . .	42
2.7	Porovnanie bezpečnostných kľúčov LTE/NB-IoT . . . . .	47
2.8	Porovnanie vyhradenej RAN, MOCN, MORAN . . . . .	52
3.1	Tabuľka jednotlivých pásiem a ich frekvenčného rozsahu pre uplink a downlink . . . . .	55
3.2	Technické špecifikácie a vylepšenia pre LTE Cat-M Vydanie 13, 14 . . .	60
3.3	Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 15 . . . . .	61
3.4	Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 16 . . . . .	62
3.5	Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 17 . . . . .	63
3.6	Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 18 . . . . .	63
3.7	Porovnanie parametrov technológií NB-IoT a LTE Cat-M . . . . .	65
4.1	Základné parametre modulu BG77 . . . . .	71
4.2	Frekvenčné pásma Cat M1 a Cat NB2 modulu BG77 . . . . .	72
4.3	Základné parametre modulu BC660K-GL . . . . .	74
4.4	Frekvenčné pásma modulu BC660K . . . . .	75
4.5	Základné parametre modulu SIM7022 . . . . .	78
4.6	Frekvenčné pásma modulu SIM7022 . . . . .	79
6.1	Meranie na mieste - Purkyňové koleje. . . . .	94
6.2	Meranie na mieste - Technologický park. . . . .	96
6.3	Meranie na mieste - MESTO - Česká. . . . .	98
6.4	Meranie na mieste - MESTO - Grohová. . . . .	100
6.5	Meranie na mieste - Podzemná garáž. . . . .	101
6.6	Meranie v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom. . . . .	103
6.7	Meranie v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom. . . . .	103
6.8	Meranie v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom. . . . .	103
6.9	Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom. . . . .	105
6.10	Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom. . . . .	105
6.11	Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom. . . . .	106
D.1	Zoznam súčiastok z programu Altium Designer. . . . .	131



# Úvod

Diplomová práca sa zameriavame na rastúci význam a vývoj priemyselného Internetu vecí (IoT), čo je kľúčová technológia súčasnosti. IoT, spájajúci fyzické predmety s digitálnymi technológiami, umožňuje nielen inteligentnú komunikáciu a zhromažďovanie dát, ale prináša aj revolúciu v priemyselnej automatizácii a efektívnosti.

Prvá kapitola opisuje charakteristiky IoT, rozvoj Machine-type Communication (MTC), Industry 4.0 a v neposlednom rade The 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

Druhá kapitola spočíva v opise NB-IoT technológie, kde sú rozobraté komunikačné scenáre, frekvenčné pásma, operačné módy, architektúra siete a šetriace režimy. V neposlednom rade rozoberá definície podľa 3GPP Vydaní. Kapitola taktiež zahŕňa opis bezpečnosti a privátne mobilné siete IoT.

Tretia kapitola spočíva v opise LTE Cat-M technológie, kde sú rozobraté komunikačné scenáre, frekvenčné pásma, operačné módy, architektúra siete a šetriace režimy. V neposlednom rade rozoberá definície podľa 3GPP Vydaní.

Štvrtá kapitola ponúka porovnanie dostupných komunikačných modulov. Porovnanie spočíva v základných parametroch, frekvenčných pásmach a šetriacich režimoch. Piata kapitola rozoberá návrh schémy a DPS modulu BC660K-GL. Obsahom je opis zapojenia konkrétnych častí schémy ako MCU, anténnej časti, MicroSD a napájania. Kapitola taktiež obsahuje návrh DPS a následné overenie funkčnosti zariadenia.

Posledná kapitola obsahuje popis meraní hraničných rádiových podmienok a prenosových rýchlostí na dvoch moduloch.



# 1 Internet of Things

Prvá kapitola je zameraná na Internet of Things (IoT). IoT nie je len technologickým prvkom, je to skôr komplexný systém, ktorý má hlboký dopad na rôzne oblasti ľudského života a priemyslu. Popísané sú charakteristiky technológie a ich bližšie využitie. Spomenutá je aj organizácia The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) a jej Vydania.

## 1.1 Charakteristika Internet of Things

Jedným z novodobých slov v oblasti informačných technológií je IoT. V podstate ide o spojenie fyzického sveta s digitálnym svetom, čo otvára dvere novým možnostiam a zmenám v spôsobe, akým komunikujeme so svojím okolím. Táto technológia umožňuje transformovať bežné objekty a zariadenia v inteligentné entity, ktoré môžu komunikovať, zbierať údaje a vykonávať autonómne úlohy podľa našich pokynov.

Zjednotenie všetkých týchto objektov pod spoločnú infraštruktúru nám dáva lepšiu kontrolu nad naším okolím a poskytuje nám cenné informácie o stave vecí, ktoré nás obklopujú. IoT má potenciál zmeniť spôsob, akým riadime naše domovy, podniky a mestá. Môže nám pomôcť zvýšiť efektívnosť, zlepšiť bezpečnosť a pohodlie a dokonca prispieť k ochrane životného prostredia [1]. Súčasne však so sebou prináša aj výzvy, vrátane otázok týkajúcich sa bezpečnosti a súkromia údajov. Je dôležité, aby sme sa týmito otázkami venovali a zabezpečili, že IoT bude pre nás prínosné a bezpečné [2].

Podľa správy spoločnosti Ericsson z novembra 2021 bude do roku 2027 na svete 30,2 miliardy IoT pripojení, z ktorých 5,5 miliardy bude celulárnych IoT pripojení a masívne IoT bude tvoriť 51 % z týchto celulárnych IoT pripojení [2].

Platforma IoT poskytuje širokú škálu funkcií vrátane pripojenia, identifikácie a adresácie zariadení, bezpečnostných funkcií a správy zariadení. Cieľom je zamerať sa na bezdrôtové komunikačné technológie, ktoré umožňujú pripojenie IoT.

## 1.2 Machine-Type Communication

MTC sa postarala o pozoruhodný rozvoj IoT a umožnila prepojenie inteligentných zariadení a platforiem riadenia do jednej integrovanej siete. V nedávnej dobe došlo k významnému pokroku v oblasti technológií charakterizovaných nízkou energetickou náročnosťou, konkrétne v oblasti Narrowband Internet of Things (NB-IoT) a dlhodobej evolúcie cez strojovú komunikáciu LTE for Machines (LTE-M) [3, 4].

Spomínané technológie boli vyvinuté s cieľom adresovať potreby IoT a bunkovej komunikácie s obmedzenou šírkou pásma. Umožňujú pripájanie zariadení k internetu, ktoré potrebujú prenášať málo množstvo údajov a zároveň si vyžadujú nízke komunikačné náklady. Napriek tomu sa v IoT stále vyskytuje mnoho zásadných problémov, ako je podpora veľkého počtu MTC zariadení alebo zníženie oneskorenia prístupu a zvýšenie spoľahlivosti, ktoré treba riešiť. Zníženie latencie je okrem mnohých iných problémov veľmi náročné, pretože je prirodzené, že latencia má tendenciu zvyšovať sa s počtom zariadení v sieti [3, 4].

### **1.3 Fourth Industrial Revolution**

Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) je termín, ktorý sa používa pre paradigmu vzájomného prepojenia rôznych strojov, zariadení, objektov a procesov. Cieľom je ľahko zhromažďovať a spracúvať údaje, a tým ďalej automatizovať a optimalizovať výrobu [5].

Priemyselný IoT je špecifický segment, ktorého cieľom je umožniť a urýchliť víziu Industry 4.0. Vyznačuje sa špecifickými priemyselnými požiadavkami na komunikáciu a prevádzku zariadení IoT. Aspekty, ktoré odlišujú priemyselný IoT, zahŕňajú vysokú úroveň odolnosti, dostupnosť komunikácie, bezpečnosť, presnosť, automatizáciu a kompatibilitu.

Bezdrôtové pripojenie sa považuje za jednu z hlavných podporných technológií, pretože môže poskytnúť požadovanú flexibilitu, efektívnosť a podporu mobility [5].

### **1.4 The 3rd Generation Partnership Project**

3GPP spája sedem organizácií na vývoj telekomunikačných štandardov, ktoré sú známe ako organizační partneri. Tieto organizácie poskytujú svojim členom stabilné prostredie na tvorbu správ a špecifikácií. Dohoda o spolupráci v správe a vývoji mobilných telekomunikačných technológií bola uzatvorená v januári 1998. Hlavným cieľom je štandardizácia a vývoj nových mobilných technológií. 3GPP pravidelne publikuje nové technológie a neustále aktualizuje existujúce technológie prostredníctvom tzv. „Vydání“ [6].

Projekt bol založený v decembri 1998 s cieľom vyvinúť špecifikáciu pre 3G mobilný telefónny systém založený na systéme 2G GSM, v rámci medzinárodnej telekomunikačnej únie International Mobile Telecommunications-2000 [7].



Najznámejšími prácami sú vývoj a údržba:

- Global System for Mobile Communications (GSM) a súvisiace 2G a 2.5G štandardy, vrátane General Packet Radio Service (GPRS) a Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE).
- UMTS a súvisiace 3G štandardy, vrátane High-Speed Packet Access (HSPA) a Evolved High-Speed Packet Access (HSPA+).
- LTE a súvisiace 4G štandardy, vrátane LTE Advance a LTE Advance Pro.
- 5G New Radio (NR) a súvisiace 5G štandardy, vrátane 5G-Advanced.



Obr. 1.1: Logo štandardizačnej skupiny 3GPP [6].



## 2 Narrowband Internet of things

Žijeme vo svete, kde každý objekt okolo nás od chladničky až po lampy na ulici môže komunikovať a vzájomne spolupracovať, aby zlepšil naše každodenné životy. Toto je vízia IoT, a práve NB-IoT stojí v popredí tejto technologickej revolúcie. V tejto kapitole je podrobne popísaný NB-IoT, špeciálne navrhnutý štandard pre IoT, ktorý sa sústreďuje na optimalizáciu spotreby energie, nákladovú efektívnosť a širokú dostupnosť siete. Rozobraté sú jeho kľúčové charakteristiky, možnosti využitia a tiež výzvy, ktorým treba čeliť pri jeho implementácií [8].

### 2.1 Úvod

NB-IoT je mobilná technológia internetu vecí spadajúca do štandardu Internet vecí s využitím technológie 3GPP mobilného internetu vecí (CIoT) a kategórie Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) sietí, ktorú 3GPP vytvorila ako súčasť Vydaní 13 a neskôr v naväzujúcom vydaní 14. Technológia bola navrhnutá pre potreby pripojenia veľkého množstva zariadení s nízkym nárokom na objem prenesených dát. Nutné je však tolerovať vyššie hodnoty prenosového oneskorenia a vyšší nárok na pokrytie oblasti [9, 10].



Obr. 2.1: Logo technológie NB-IoT [11].

Napriek tomu, že je integrovaná do normy LTE, možno ju považovať za nové vzdušné rozhranie. Jeho jednoduchosť umožňuje zníženie nákladov na zariadenie a taktiež minimalizáciu spotreby batérie. Spomínané úpravy v porovnaní s pôvodným LTE štandardom výrazne znížili výrobné náklady a súčasne aj zložitosť zariadenia. Rovnako ako pri sieťovej infraštruktúre, kde NB-IoT využíva prvky zo štandardu LTE sietí, tak aj fyzická vrstva má svoj pôvod v LTE sieti. Vďaka zdieľaným pásmam môžu NB-IoT a LTE spolu fungovať paralelne [12, 13].

Pre mnohonásobný prístup využíva technológia NB-IoT ortogonálne frekvenčné delenie Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) a Single Carrier - Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA). Technológia bola navrhnutá pre šírku pásma 180 kHz, ktorá je totožná so šírkou jedného Resource Blocku (RB) technológie LTE. Môže využívať až 12 subnosných pri šírke 15 kHz pri downlinku a uplinku a jej maximálna dosiahnuteľná prenosová rýchlosť je 27 kb/s pre downlink a 32 kb/s pre uplink. Teoretický dosah sa v meste odhaduje na 1 km a 10 km na vidieku. Navrhnutá je primárne pre stacionárne zariadenia, a preto nepodporuje funkciu hand-over, ako to je pri LTE a LTE Cat-M. Táto funkcia bola pridaná v rámci Vydania 14 [9].

Tu sú niektoré z jeho hlavných výhod a vlastností:

- **Nízka spotreba energie** - zariadenia sú optimalizované pre nízku spotrebu energie, čo umožňuje batériám v IoT zariadeniach vydržať až niekoľko rokov bez výmeny.
- **Pokrytie** - poskytuje lepšie pokrytie v porovnaní s klasickými bezdrôtovými sieťami, lepšie preniká do budovy a náročných priestorov.
- **Nízke náklady** - výrobné náklady na moduly sú relatívne nízke, vďaka čomu je možné ich nasadenie vo veľkom množstve za ekonomicky efektívne ceny.
- **Zabezpečenie a spoľahlivosť** - podporuje šifrovanie a autentifikačné protokoly, čo zaručuje bezpečnú komunikáciu a ochranu dát [9].

## 2.2 Komunikačné scenáre

V tejto podkapitole sú rozpracované kľúčové oblasti využitia NB-IoT a predstavené reálne príklady aplikácií. Technológia NB-IoT prispieva k efektívnosti, bezpečnosti a inováciám v rôznych sektoroch. NB-IoT je navrhnutý tak, aby bol kompatibilný s existujúcimi sieťami, čo umožňuje jednoduchú integráciu a rýchlu implementáciu do rôznych prostredí [14]. S nízkymi nákladmi na prevádzku, dlhou životnosťou batérie a schopnosťou fungovať v náročných podmienkach sa NB-IoT stáva preferovanou voľbou pre mnoho aplikácií, od inteligentných miest po priemyselnú automatizáciu.

V nasledujúcich troch odstavcoch sú rozobraté reálne využitia NB-IoT. Opísané sú výhody použitia technológie a taktiež aj ich nevýhody.

Prvé reálne využitie je v inteligentných nemocniciach. Už nástup IoT viedol k zavedeniu inteligentných zariadení a infraštruktúry do nemocníc. Pre vzájomné prepojenie inteligentných zariadení sa použil NB-IoT. To zahŕňa, napr. inteligentné monitorovacie centrum, inteligentný odpočet životných funkcií pacienta a v neposlednom rade inteligentné parkovanie pre pacientov. Koncept inteligentných nemocníc sa rozdeľuje do dvoch scenárov. Prvým scenárom je klinická starostlivosť, pri ktorej je pacient priamo v nemocnici. Druhým scenárom je vzdialená starostlivosť

umožňujúca na diaľku monitorovať napr. krvný tlak pacienta alebo jeho srdcový tep. Existuje však niekoľko aspektov, kvôli ktorým nie je len čiastočne vhodný. Medzi ne patrí napr. vysoká latencia (ovplyvňuje presnosť a spoľahlivosť údajov), bezpečnosť údajov a ochrana súkromia alebo vysoké náklady [13, 14].

Druhým reálnym využitím je v oblasti inteligentného parkovania. Parkovanie je veľkým problémom hlavne vo veľkých mestách. Inteligentný parkovací ekosystém zabezpečuje zníženie dopravných zápch a rýchle vyhľadávanie parkovacieho miesta, čím poskytuje lepšie riadenie parkovania. Inteligentné parkovacie riešenia sú charakterizované zberom informácií, nasadením systému a distribúciou služieb. S cieľom zlepšiť skúsenosti používateľov s platením a znížiť náklady na nasadenie, uvažujú o riešení parkovania založenom na NB-IoT, kde navrhovaný systém pozostáva zo senzorových uzlov v parkovacom priestore, cloudového servera na poskytovanie informácií o okolí, aplikácie zariadenia pre používateľov a platobného procesu [13, 14].

Tretie reálne využitie môžeme nájsť v inteligentných domácnostiach. Inteligentná domácnosť zahŕňa riadenie spotreby energie, zabezpečenie domácnosti a inteligentné meranie. Inteligentné meranie pomáha znižovať počet pracovníkov tým, že na diaľku a automaticky zhromažďuje údaje prostredníctvom bunkovej siete. Inteligentné merania sa v domácnostiach rozdeľujú na meranie energie, monitorovanie kvality ovzdušia a vonkajšie inteligentné parkovanie. Výkonnosť tohto systému sa analyzuje z hľadiska kapacity, pokrytia a účinnosti systému. Systém diaľkového monitorovania ponúka ovládanie intenzity svetla, vlhkosti, teploty a iných funkcií spojených s uľahčením života v inteligentných domácnostiach [13, 14].

## 2.3 Frekvenčné pásma

Technológie NB-IoT a LTE využívajú rovnaké frekvenčné pásma, avšak v časti vyhradenej pre NB-IoT, Tab. 2.1. V Európe je momentálne dostupné v frekvenčných pásmach B3 (1800 MHz), B8 (900 MHz) a B20 (800 MHz). V Českej republike ponúka mobilný operátor sieť NB-IoT v pásme B20 [15]. Je dôležité poznamenať, že NB-IoT využíva frekvenčné pásma v nižších rozsahoch, čo má za následok, že zariadenia používajúce túto technológiu budú často operovať v náročných rádiových podmienkach [12, 16, 17].

Tab. 2.1: Frekvenčné pásma pre NB-IoT podľa 3GPP Vydanie 13 [15, 17].

Číslo pásma	Rozsah frekvencií pre uplink [MHz]	Rozsah frekvencií pre downlink [MHz]
1	1920 - 1980	2110 - 2170
2	1850 - 1910	1930 - 1990
3	1710 - 1785	1805 - 1880
5	824 - 849	869 - 894
8	880 - 915	925 - 960
12	699 - 716	729 - 746
13	777 - 787	746 - 756
17	704 - 716	734 - 746
18	815 - 830	860 - 875
19	830 - 845	875 - 890
20	832 - 862	791 - 821
26	814 - 849	859 - 894
28	703 - 748	758 - 803
66	1710 - 1780	2110 - 2200

## 2.4 Operačné módy

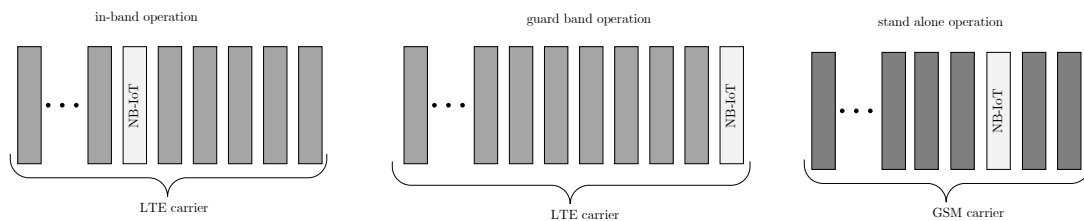
NB-IoT technológia využíva frekvenčné pásmo so šírkou pásma 180 kHz, čo je ekvivalentom jedného zdrojového bloku používanému pri prenose LTE [18].

S touto voľbou sú dostupné nasledujúce prevádzkové režimy:

- **Stand alone** - technológia NB-IoT využíva voľné pásma technológie GSM, ktoré je rozdelené na bloky široké 200 kHz. Vložením technológie NB-IoT do jedného z týchto blokov vzniká obojstranné 10 kHz ochranné pásmo komunikačného kanálu.
- **Guard band** - komunikačný kanál je umiestnený do ochranného pásma LTE siete a tým sa využijú doposiaľ nevyužitú zdrojové bloky technológie LTE. Šírka pásma je 180 kHz, čo zahŕňa 12 subnosných po 15 kHz. V pásme sú pre synchronizáciu využité výhradne signály patriace do ochranného intervalu.
- **In-band** - komunikačný kanál je umiestnený vnútri pásma nosných technológií LTE a zdrojové bloky sú využité. V tomto operačnom režime nie je možné použiť ľubovoľný zdrojový blok, ale iba tie, ktoré sú definované [8, 9, 17].

## 2.5 Architektúra siete

Architektúra NB-IoT zjednodušuje už existujúcu architektúru Evolved Packet Core (EPC) s cieľom riešiť požiadavky prevádzkových modelov IoT. Prenos malých dát je založený na zjednodušenej architektúre, ktorá je určená na prenos malých dát



Obr. 2.2: Operačné módy NB-IoT [19].

cez signalizačné správy Non Access Stratum (NAS) [20]. Vyhradený uzol v základnej sieti pre CIoT kombinuje funkcie C-plane a U-plane, vrátane integrácie funkcií, ktoré sú zvyčajne súčasťou Mobility Management Entity (MME) a Serving Gateway (SGW). Vyskytujú sa prípady rozšírenia tejto funkcie na Packet Data Network Gateway (PGW) v rámci novej logickej entity známej ako CIoT Serving Gateway Node (C-SGN). Implementácia C-SGN je konfigurovateľná a prispôbena tak, aby podporovala nevyhnutnú funkčnosť, ktorá je potrebná pre prípady použitia v rámci IoT [20].

S1-lite je optimalizovaná verzia Control plane S1 based on the SIAP protocol (S1-C) a rozhranie medzi Evolved Node B (eNodeB) a MME. Pri S1-C sú podporované iba potrebné správy Session Initiation Application Part (SIAP) (a vo vnútri iba požadované časti) pre procedúry CIoT, a taktiež sú podporované optimalizované bezpečnostné procedúry. Spomínaná architektúra podporuje určité modifikácie (napr. natívnu podporu SMS v doméne PS alebo zjednodušený NAS).

V NB-IoT sú na optimalizáciu okrem starého nastavenia pripojenia Radio Resource Control (RRC) zavedené dve riešenia. Prvým z riešení je Data-over-NAS (DONAS). Riešenie je povinné a ide o optimalizáciu riadiacej roviny riešenia 2. DONAS umožňuje prenos dát bez nutnosti aktivácie užívateľskej roviny. Druhým riešením je optimalizácia užívateľskej roviny s názvom RRC Suspend/Resume.

RRC Suspend/Resume predstavuje vylepšenia na deaktiváciu a obnovenie užívateľskej roviny efektívnym spôsobom. Pri optimalizácii riadiacej roviny sa údaje odosielaajú cez Non-access stratum (NAS), priamo z entít riadenia mobility MME v jadrovej sieti do User Equipment (UE) bez interakcie zo základňovej stanice. Postupy RRC Suspend/Resume znižujú réžiu signalizácie a taktiež zlepšujú životnosť batérie UE.

Architektúra protokolu NB-IoT je rozdelená na riadiacu a užívateľskú rovinu.

Riadiaca rovina zahŕňa protokoly, ktoré riadia rádiový prístup a spojenie medzi koncovým zariadením (UE) a sieťou. Najvyššia vrstva riadiacej roviny sa nazýva NAS a zabezpečuje prenos rádiovéj signalizácie medzi UE a EPC, pričom táto sig-

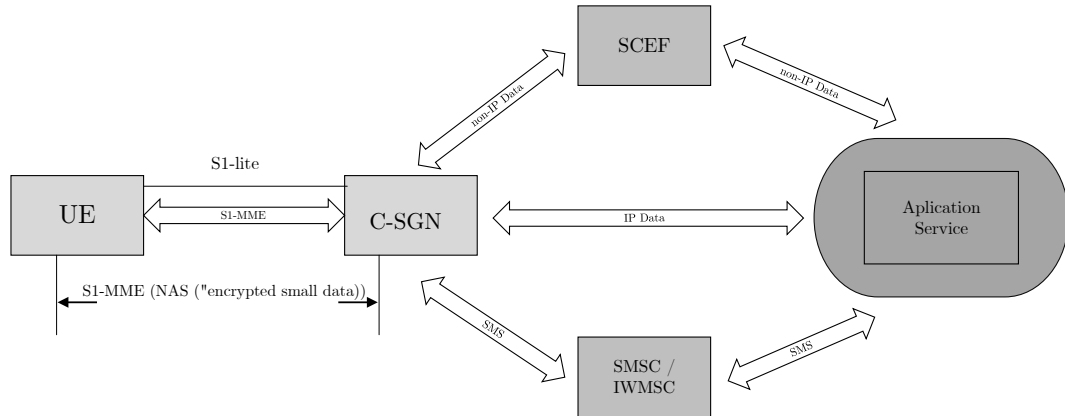
nalizácia prechádza cez rádiovú sieť transparentne. NAS má za úlohu autentifikáciu, kontrolu bezpečnosti, riadenie mobility a správu nosičov.

Access Stratum (AS) je funkčná vrstva pod NAS a v rámci riadiacej roviny obsahuje protokol RRC. RRC má na starosti konfiguráciu užívateľskej a riadiacej roviny v závislosti od stavu siete. Existujú dva hlavné stavy RRC, a to RRC-Idle a RRC-Connected. Entita RRC zabezpečuje prepínanie medzi týmito stavmi. V režime RRC-Idle je sieť informovaná o prítomnosti UE v sieti, pričom UE je pripravené na príjem prichádzajúcich hovorov. V režime RRC-Connected má UE aktívne spojenie s eNodeB, a sieť má presnú informáciu o polohe UE na úrovni bunky, čo umožňuje UE prijímať a odosielať dáta. Pre šetrenie batérie UE a rádiových zdrojov sa pripojenie zruší a prejde do režimu RRC-Idle, ak nie je žiadna prevádzka. Procedúry pozastavenia/obnovenia RRC znižujú množstvo signalizácie potrebné pre prechod UE medzi nečinným a pripojeným stavom, čím sa znižuje zaťaženie signalizačnými správami oproti starším postupom [20].

Pre podporu procedúry RRC Suspend/Resume, MME, eNodeB a UE sa musia zahrnúť nové funkcie. MME, ktoré je zodpovedné za riadenie mobility UE, musí podporovať nové procedúry na S1AP, konkrétne S1AP procedúru spustenú procedúrami "RRC Suspend" a "RRC Resume" na rádiové rozhranie. MME musí tiež ukladať informácie o kontexte UE, keď je RRC spojenie pozastavené a asociácia S1AP sa udržiava. eNodeB by mala zahŕňať podporu pre ukladanie kontextu UE, ako aj parametre súvisiace s asociáciou S1AP, keď je UE v novom stave CIoT RRC-Idle. Tieto procedúry budú implementované medzi eNodeB a UE, ako aj medzi eNodeB a MME. Nakoniec musí UE ukladať relevantné informácie AS, keď UE prejde do stavu CIoT RRC Idle a musí podporovať procedúry potrebné na pozastavenie a obnovenie RRC spojenia. Podpora DONAS (Data Over NAS) je povinná pre obe, UE aj sieť. Toto riešenie poskytuje efektívnu podporu pre sporadický prenos malých dát pre IoT a podporu pre ne-IP dáta.

Dáta môžu byť tiež doručované cez Service Capability Exposure Function (SCEF), ktorá sa používa na doručovanie ne-IP dát cez riadiacu rovinu. Prvok SCEF je súčasťou Architecture Enhancements for Service Capability Exposure (AESE) predstavené vo Vydaní 13, ktoré zobrazujú sieťové služby tretím stranám [20].





Obr. 2.3: Schéma architektúry NB-IoT siete [20].

## 2.6 Šetriace režimy

Táto časť sa zaoberá mechanizmami úspory energie NB-IoT a rôznymi stavmi zariadenia na základe spotreby energie. Pre komunikáciu zariadenia a eNodeB vyžaduje nadviazanie spojenia s riadeným rádiovým zdrojom (RRC). Tento stav zariadenia sa nazýva stav RRC Connected. Keď zariadenie uvoľní svoje aktívne pripojenie RRC, prejde do stavu nečinnosti RRC. V stave RRC Connected spotrebúva značne viac energie z dôvodu vytvorenia vyhradenej nosnej na začatie prenosu údajov a pre potrebu monitorovania downlink kanálu vo všetkých podrámcoch s výnimkou podrámcoch vyhradených pre prenos uplinku [21].

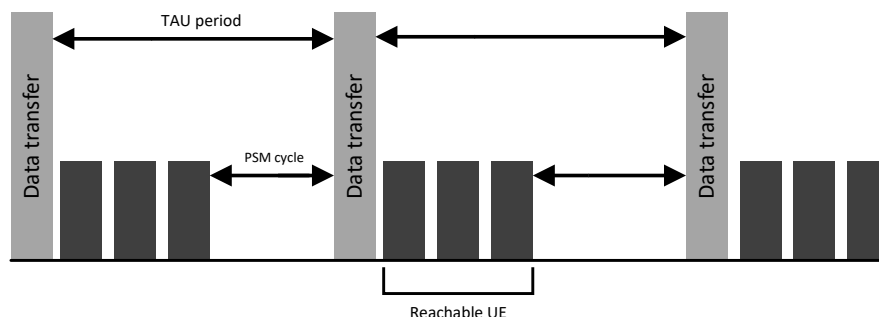
Existujú dva mechanizmy úspory energie NB-IoT, ktoré sa zameriavajú na dlhodobú životnosť batérie. Tieto mechanizmy upravujú spôsob komunikácie zariadenia so sieťou úpravou časovačov prechodu stavu RRC.

### 2.6.1 Power Saving Mode

Power Saving Mode (PSM) pracuje v stave nečinnosti RRC a umožňuje zariadeniu prejsť do hlbokého spánku. V stave hlbokého spánku je zariadenie nedostupné sieťou, ale zostáva v nej registrované. Cyklus PSM zahŕňa periodický príjem pagingových správ a hlboký spánok. Pre väčšinu IoT scenárov nie je latencia downlinku dôležitá a stačí len zriedkavo monitorovať paging, čo umožňuje zariadeniu byť v hlbokom spánku po dlhú dobu [16]. NB-IoT podporuje jeden časovač cyklu PSM s názvom T3412, ktorý ponúka maximálnu hodnotu až 310 hodín (12,91 dňa).

Ak zariadenie v stave PSM generuje paket uplinku, prepne sa do stavu paging, aby monitoroval riadiaci kanál pre pridelenie uplinku. Ak existuje dátový paket down-

linku pre zariadenie počas stavu hlbokého spánku, sieť uloží paket do vyrovnávacej pamäte a odošle ho, keď zariadenie opustí cyklus PSM [22]. Zariadenie ukončí PSM po uplynutí časovača T3412 rozšíreného o spustenie procedúry pravidelnej aktualizácie oblasti sledovania Tracking Area Update (TAU), aby upozornila sieť na dostupnosť.



Obr. 2.4: Šetriaci režim PSM [22, 23].

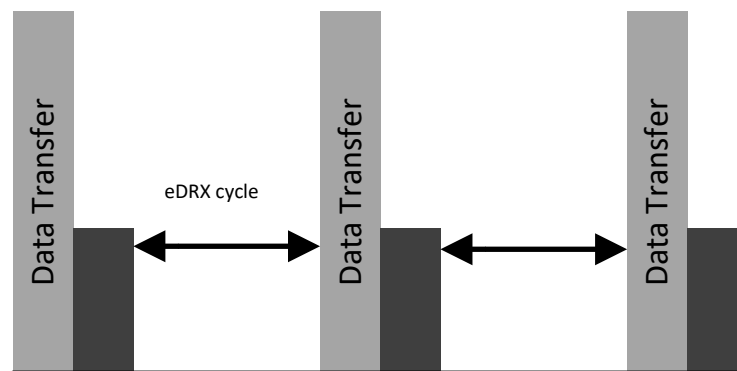
## 2.6.2 Extended Discontinuous Reception

Zariadenie NB-IoT môže použiť na šetrenie energie Extended Discontinuous Reception (eDRX), rozšírenie existujúceho prerušovaného príjmu Discontinuous Reception (DRX) v LTE. Je podobné ako DRX, ale s dlhšími hodnotami časovača na dosiahnutie zlepšenia spotreby energie [15]. Mechanizmus je možné použiť v prípade, keď je zariadenie v niektorom zo stavov RRC. Špecifikuje časovače na deaktiváciu monitorovania radiaceho kanála downlinku.

eDRX pracuje v cykloch, kde každý cyklus pozostáva z doby zapnutia, počas ktorej zariadenie monitoruje radiaci kanál downlinku a periódu eDRX, kedy zariadenie šetrí batériu a prestáva monitorovať radiaci kanál. Monitorovanie radiaceho kanálu pre indikáciu údajov downlinku je známe ako paging. Počas týchto periodických cyklov je zariadenie v nečinnom stave. V tomto stave zostáva až do bodu vypršania časovača bez akejkoľvek aktivity na radiacom kanáli a následne sa prepne do stavu PSM [22]. Keďže monitorovanie radiaceho kanála spotrebúva výrazne viac energie ako v prípade nečinnosti, sú paging a nečinnosť dva rôzne stavy. V prípade, že monitorované radiace správy obsahujú indikáciu údajov uplinku alebo pridelenie uplinku, zariadenie sa prepne do stavu pripojené. Nutnosťou je optimalizovať eDRX časovač, aby sa zvládol kompromis medzi spotrebou energie a latenciou komunikácie downlinku [16]. V stave pripojenia RRC je maximálny cyklus eDRX 10,24 sekundy

a v stave nečinnosti je to 10 485,76 sekundy (2,91 hodiny). V prípadoch používania IoT by obdobie nečinnosti RRC malo byť krátke. Z toho vyplýva, že spotreba energie je pri pripojení RRC výrazne väčšia ako pri stave nečinnosti [15].

V porovnaní s PSM šetrí eDRX menej energie, ale poskytuje lepšiu downlink komunikačnú latenciu. Vďaka tomu je možné použiť mechanizmy PSM a eDRX na prispôsobenie sa rôznym scenárom IoT. Zmena stavu závisí od správania zariadenia, sieťovej prevádzky a spôsobu použitia. Nutné je vybrať vhodnú konfiguráciu eDRX a periódu pagingu pre rôzne druhy prevádzky, aby sa dosiahlo vyrovnanie úspory energie a oneskorenie komunikácie na minimum [15, 16, 22].



Obr. 2.5: Šetriaci režim eDRX [22, 23].

## 2.7 Definícia podľa 3GPP Vydania

Na ceste k dosiahnutiu úplnej realizácie IoT, zohráva štandardizácia komunikačných protokolov a technológií kľúčovú úlohu. Táto úloha spadá pod jednu z najvýznamnejších telekomunikačných organizácií 3GPP. Táto kapitola detailne rozoberá analýzy rôznych vydaní 3GPP štandardov, ktoré boli vyvinuté s cieľom optimalizovať a podporiť implementáciu NB-IoT technológie. Preskúvané sú jednotlivé Vydania od 3GPP, zamerané na kľúčové vylepšenia, funkcionality a prínosy pre ekosystém NB-IoT. Taktiež je identifikované, ako tieto štandardy prispievajú k rozvoju inteligentnejších, spoľahlivejších a efektívnejších IoT riešení.

### 2.7.1 Definícia podľa 3GPP Vydanie 13

Vydanie 13 je významným míľnikom v evolúcii štandardov mobilnej komunikácie, a zohráva kľúčovú úlohu v podpore a rozvoji IoT. Toto vydanie bolo špeciálne navrhnuté s ohľadom na nízkoprikonové širokopásmové siete (LPWAN), ako je NB-IoT,

a prináša so sebou radu vylepšení a nových funkcií. Prináša vylepšenia v oblasti efektivity spektra, kapacity siete a dosahu [24]. Zameriava sa aj na energetickú efektivitu, čo je kritický aspekt pre batériu napájané IoT zariadenia. Špecifikuje nové stavy a procedúry pre úsporu energie, ako napríklad eDRX a PSM, ktoré umožňujú zariadeniam minimalizovať spotrebu energie, keď nie sú aktívne.

Taktiež posilňuje bezpečnosť a spoľahlivosť siete. Zavádza nové protokoly a mechanizmy na zabezpečenie dát, autentizáciu zariadení a ochranu siete pred neautorizovaným prístupom [24, 25].

### **2.7.2 Definícia podľa 3GPP Vydanie 14**

Vo vydaní 14 bola pridaná podpora ďalších funkcií LTE s cieľom zvýšiť funkčnosť a počet prípadov použitia, ktoré NB-IoT pokrýva. Medzi funkcie vo vydaní 14 patrí podpora metódy určovania polohy Enhanced Cell Identifier (ECID) a Observed Time Difference of Arrival (OTDOA) na základe Narrowband Positioning Reference Signal (NPRS), vylepšenia mobility a kontinuity služieb, nová výkonová trieda so zníženým výstupným výkonom 14 dBm, Single-cell Point-to-Multipoint (SC-PTM) pre broadcast/multicast služby na základe architektúry Multimedia Broadcast/Multicast Services (MBMS), zlepšenie špičkovej priepustnosti v downlinku (144 kb/s) a v uplinku (142.5 kb/s) a nová kategória zariadení Cat-NB2 s vyššími hodnotami Transport Block Size (TBS) v uplinku a downlinku [24].

Na vylepšenie presnosti určovania polohy UE bolo vyvinuté značné úsilie. Napriek predpokladu, že NB-IoT pokrýva prípady použitia s najnižšou zložitostou, táto funkcia otvára nové možnosti. Určovanie polohy je založené na rovnakom koncepte ako pri určovaní polohy pri LTE s názvom OTDOA ako bolo spomenuté vyššie. Špecifické rádiové signály s názvom NPRS vysielajú viaceré bunky v nakonfigurovaných periodických časových príležitostiach.

Tab. 2.2: Technické špecifikácie a vylepšenia pre NB-IoT Vydanie 13, 14 [24, 25].

	<b>Vydanie 13</b>	<b>Vydanie 14</b>
Info	Zavedenie NB-IoT	Rozšírenie NB-IoT
Duplexovanie	Podpora H-FDD	Podpora H-FDD
Prenos dát	Malé dátové prenosy	Zlepšenie malých dátových prenosov
Energetická účinnosť	eDRX a PSM	Vylepšenie energetickej účinnosti
Zlepšenia výkonu	-	Zvýšený prietok a spektrálna účinnosť
Podpora multicastu	-	Zavedená podpora multicastu
Zlepšenia mobility	-	Zlepšená podpora mobility zariadení
Zlepšenia latencie	-	Znížená latencia
Vyššie dátové rýchlosti	-	Podpora vyšších dátových rýchlostí
Max Downlink TBS [b]	680	2536
Max Downlink dátová rýchlosť [kb/s]	26	80/127 (1HARQ/2HARQ)
Max Uplink TBS [b]	1000	2536
Max Uplink dátová rýchlosť [kb/s]	62	105/159 (1HARQ/2HARQ)
Šírka pásma [kHz]	200	200
Modulácia Downlink	OFDM	OFDM
Modulácia Uplink	SC-FDMA	SC-FDMA
Vrcholová rýchlosť Downlink [kb/s]	26	127
Vrcholová rýchlosť Uplink [kb/s]	66	159
Latencia [ms]	1500 - 10000	700 - 2000
Počet antén	1	1
Šírka pásma prijímača [kHz]	200	200
Retazce prijímača	1 (SISO)	1-2
Výkon vysielacza [dBm]	20 / 23	14 / 20 / 23
Nižšia trieda výkonu pre NB-IoT	-	Nižšia trieda výkonu (14 dBm)
Zlepšenia kapacity buniek	-	Zlepšená kapacita buniek
Zlepšená mobilita pre NB-IoT	-	RRC obnovenie spojenia
Zlepšené určovanie polohy	-	Vylepšené Cell-ID (E-CID) a OTDOA

### 2.7.3 Definícia podľa 3GPP Vydanie 15

Vydanie 15 zaviedlo podporu Time Division Duplexing (TDD), vyššiu spektrálnu účinnosť, skorý prenos dát, mechanizmus budenia a prístup k sieti na požiadanie pre úsporu energie UE, zvýšenie spoľahlivosti a dosahu NB-IoT Physical Random Access Channel (NPRACH) a podporu malých buniek. Medzi doplnky Vydania 15 patrí koexistencia NB-IoT s 5G New Radio (NR) a koexistencia NB-IoT s enhanced Machine Type Communication (eMTC).

Z tohto zoznamu sú pravdepodobne dve najdôležitejšie funkcie z hľadiska potenciálu pokryť nové prípady použitia a zvýšiť počet zariadení NB-IoT, a to určovanie polohy OTDOA zahrnuté vo vydaní 14 a komunikácia medzi zariadeniami Device-to-Device (D2D) zahrnuté vo vydaní 15 [24].

Komunikácia D2D sa používa na vytvorenie komunikácie na krátke vzdialenosti medzi zariadeniami, čo výrazne znižuje spotrebu energie a zvyšuje pokrytie na okraji bunky. Spojením technológií NB-IoT a komunikácie D2D umožňuje znížiť spotrebu nositeľných zariadení (napr. smartfón) a ďalej rozšíriť pokrytie v extrémnych scenároch nasadenia IoT [24].

Tab. 2.3: Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 15 [24].

Vydanie 15	
Maximálna dátová rýchlosť [kb/s]	127 / 158
Podpora pásma	Podpora úzkych pásiem
Šetriace režimy	PSM a eDRX
Latencia	Vyššia, optimalizovaná pre IoT
Podpora mobility	Základná mobilita
Kódovanie a modulácia	BPSK, QPSK
Spätná kompatibilita	Kompatibilná s LTE
Bezpečnosť	Základné bezpečnostné funkcie
Pokrytie	Vylepšené pokrytie pre rôzne prostredia
Podpora VoLTE	Nie je podporované / obmedzené
Podpora zariadení	Optimalizované pre jednoduché IoT zariadenia
Frekvenčná efektívnosť	Efektívne využitie úzkych pásiem
Podpora multicástových operácií	Obmedzená
Interoperabilita s inými technológiami	Základná
Podpora pre viacnásobné pripojenia	Nie
Vylepšenia pre senzorové siete	Štandardné funkcie
Adaptívna alokácia spektra	Nie

## 2.7.4 Definícia podľa 3GPP Vydanie 16

Zavedené vylepšenia vo vydaní 16 súvisia s vylepšeniami predchádzajúceho Vydanía. Medzi hlavné vylepšenia patrí zvýšenie účinnosti prenosu downlinku a uplinku, zníženie spotreby energie užívateľských zariadení, lepšie plánovanie, zdokonalená správa siete a prevádzka s viacerými nosnými, vylepšená mobilita, ako aj štúdia koexistencie s NR [24].

Ako už bolo spomenuté, špecifikácie pre NB-IoT Vydanía 16 sa zameriavajú na prevádzku siete a zlepšenie efektívnosti. Patrí tam Early Data Transmission (EDT) s Mobile-Terminated (MT) pre užívateľské dáta.

Cielom zoskupenia UE pre Wake-Up Signal (WUS) je zníženie pravdepodobnosti falošného poplachu. Vylepšenie plánovania je riešené pomocou viacerých transportných blokov downlink/uplink s alebo bez Downlink Control Information (DCI) pre SC-PTM a unicast na podporu oddeleného/spoločného prenosu Single Cell Multicast Traffic Channel (SC-TMCH). Došlo k vylepšeniu nástroja na správu siete, ktoré zahŕňa podporu pre Self-Organizing Networks (SON) s Automatic Neighbour Relation (ANR), zlepšenie výkonu náhodného prístupu a hlásenia Radio Link Failure (RLF)[24].

Tab. 2.4: Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 16 [24].

Vydanie 16	
Maximálna dátová rýchlosť [kb/s]	Zvýšená rýchlosť pre špecifické aplikácie
Podpora pásma	Rozšírená podpora pásiem s lepšou efektívnosťou
Šetriace režimy	Vylepšené verzie PSM a eDRX
Latencia	Znížená latencia pre lepšiu odozvu
Podpora mobility	Vylepšená mobilita pre IoT zariadenia
Kódovanie a modulácia	Vylepšené modulačné schémy pre vyššiu efektívnosť
Spätná kompatibilita	Kompatibilná s LTE a novšími štandardami
Bezpečnosť	Rozšírené bezpečnostné funkcie a protokoly
Pokrytie	Optimalizované pokrytie pre aplikácie
Podpora VoLTE	Možná podpora pre VoLTE v špecifických scenároch
Podpora zariadení	Podpora pre zložitejšie IoT aplikácie a zariadenia
Frekvenčná efektívnosť	Vylepšené využitie spektra pre vyššiu prenosovú kapacitu
Podpora multicastových operácií	Rozšírená a vylepšená
Interoperabilita s inými technológiami	Vylepšená interoperabilita s LTE-M a 5G
Podpora pre viacnásobné pripojenia	Áno, vylepšená podpora
Vylepšenia pre senzorové siete	Rozšírené funkcie pre komplexnejšie senzorové siete
Adaptívna alokácia spektra	Áno, pre lepšiu flexibilitu a efektívnosť

## 2.7.5 Definícia podľa 3GPP Vydanie 17

3GPP predstavila vo vydaní 17 zariadenia RedCap NR, ktoré so sebou priniesli nižšie náklady, menšiu zložitost a dlhšiu životnosť batérie v porovnaní s bežnými zariadeniami NR. Okrem toho bol RedCap predstavený s cieľom splniť požiadavky na IoT služby s nízkymi nákladmi, širokým pásmom, strednou prenosovou rýchlosťou a bez tolerancie na oneskorenie [4].

RedCap teda dedí väčšinu kľúčových výhod NR. Patrí sem schopnosť pripojenia k jadru 5G, ktoré je cloudová platforma so služobnou architektúrou, podpora veľmi širokého spektra frekvenčných pásiem, energetická efektívnosť siete vďaka ultra-flexibilnému dizajnu, forward-kompatibilné a založené na zväzkoch vzduchové rozhrania a podpora pásiem milimetrových vln. Cieľové prípadové použitia zahŕňajú nositeľnú elektroniku, medicínske snímače, diaľkovú chirurgiu, priemyselné snímače, bezpečnostné kamery a ďalšie. Vydanie 17 RedCapu ponúka množstvo vylepšení, ktoré z neho robia špičkové riešenie pre aplikácie IoT. Jednou z najvýraznejších vlastností je jeho schopnosť poskytovať možnosti segmentácie siete, čím vytvára virtuálne siete v rámci jednej fyzickej siete, zvyšuje efektívnosť siete a zabezpečuje optimálne využitie zdrojov. Funkcia určovania polohy Vydanie 17 bola tiež vylepšená, čo poskytuje presnejšie služby založené na lokalite a umožňuje využitie nových aplikácií založených na lokalite [4].

Tab. 2.5: Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 17 [4].

Vydanie 17	
Zariadenia	RedCap NR
Náklady a zložitost	Nižšie náklady, menšia zložitost
Životnosť batérie	Dlhšia životnosť batérie v porovnaní s bežnými zariadeniami NR
Prenosové rýchlosti	-
Podpora spektra	Podpora širokého spektra frekvenčných pásiem
Energetická efektívnosť	Energetická efektívnosť siete vďaka ultra-flexibilnému dizajnu
Použitie v aplikáciách	Nositeľná elektronika, medicínske snímače, diaľková chirurgia, priemyselné snímače.
Určovanie polohy	Vylepšené služby založené na lokalite
Technológia a funkcie	-
Kompatibilita s 5G	Pripojenie ku jadru 5G, cloudová platforma so služobnou architektúrou
Segmentácia siete	Schopnosť vytvárať virtuálne siete v rámci jednej fyzickej siete
Komunikácia medzi zariadeniami	-
Frekvenčné pásma	-
Antény	-
Prípady použitia	Bezpečnostné kamery, nositeľná elektronika, medicínske snímače



## 2.7.6 Definícia podľa 3GPP Vydanie 18

Jedným z kľúčových pokrokov Vydania 18 je podpora vyšších prenosových rýchlostí, ktoré poskytujú rýchlejší prenos dát a umožňujú použitie nových aplikácií vyžadujúce vyššiu šírku pásma. Významným vylepšením je taktiež podpora nelicencovaného spektra, ktorá rozširuje dostupné spektrum pre zariadenia IoT a umožňuje nové prípady použitia. Taktiež bola integrovaná pokročilá funkcia určovania polohy, ktorá ďalej zlepšuje služby založené na lokalizácií.

Integrácia bočného prenosu v blízkosti umožňuje priamu komunikáciu medzi zariadeniami, poskytuje novú úroveň pohodlia a umožňuje nové prípady použitia. Okrem toho sa pridali kroky na ďalšie znižovanie zložitosti RedCap UE, čím sa stáva ešte používateľsky prívetivejším a dostupnejším [26].

Tieto vylepšenia a nové funkcie robia Vydanie 18 RedCap CIoT nevyhnutným pre každého, kto chce zostať v popredí technológie IoT. RedCap má jedinečné vlastnosti integrované so službami 5G NR a bol objektívne navrhnutý tak, aby udržiaval zariadenia s nižšou zložitou s maximálnou šírkou pásma 20 alebo 100 MHz v sub-7 alebo v pásmach milimetrových vln s jednou alebo dvoma anténami Rx. Okrem toho, 3GPP predstavila tento štandard vzhľadom na schopnosť RedCap spolu existovať s funkciami Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC), používať vyššie frekvenčné pásma a uplatňovať ďalšie vlastnosti 5G, ako je sieťový slicing. Napríklad, RedCap je navrhnutý tak, aby poskytoval výrazne vyššie dátové rýchlosti

v porovnaní s predchádzajúcou technológiou CIoT vo vydaní 17 s použitím vyššieho frekvenčného pásma, technológie Multiple-input multiple-output (MIMO), pokročilých modulačných techník, pokročilých vlastností tvorby lúčov a sieťového slicing. Prípady použitia pre RedCap sú menej náročné na životnosť batérie ako prípady použitia mMTC, ale vyžadujú sa vyššie požiadavky na priepustnosť a latenciu. Napriek tomu je potrebná vyššia dátová rýchlosť až 100 Mb/s, aby sa zabezpečila podpora pre živý video prenos, vizuálnu produkciu a automatizáciu procesov. Tento prístup umožňuje nové prípady použitia, ktoré boli predtým nemožné [26].

Tab. 2.6: Technické špecifikácie pre NB-IoT Vydanie 18 [26].

Vydanie 18	
Zariadenia	RedCap CIoT
Náklady a zložitosť	Ďalšie zníženie zložitosti RedCap UE
Životnosť batérie	-
Prenosové rýchlosti	Výrazne vyššie dátové rýchlosti v porovnaní s Vydaním 17
Podpora spektra	Podpora vyšších frekvenčných pásiem a nelicencovaného spektra
Energetická efektívnosť	-
Použitie v aplikáciách	Podpora pre živý video prenos, vizuálnu produkciu, automatizáciu procesov, atď.
Určovanie polohy	Pokročilé určovanie polohy pre presnejšie služby založené na lokalite
Technológia a funkcie	Multiple-input multiple-output (MIMO), pokročilé modulačné techniky, tvorba lúčov, sieťový slicing
Kompatibilita s 5G	Integrované so službami 5G NR, podpora Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC)
Segmentácia siete	-
Komunikácia medzi zariadeniami	Integrácia bočného prenosu v blízkosti umožňujúca priamu komunikáciu medzi zariadeniami
Frekvenčné pásma	Podpora až 20 alebo 100 MHz v sub-7 alebo v pásmach milimetrových vln
Antény	Podpora jednej alebo dvoch antén Rx

## 2.8 Bezpečnosť

Mechanizmy zabezpečenia NB-IoT pripomínajú tie v systémoch LTE, z ktorého boli odvodené. V nasledujúcej podkapitole je poskytnutý podrobný prehľad mechanizmov zabezpečenia NB-IoT vrátane autentifikácie koncového zariadenia, zabezpečenia Non-Access Stratum a nastavenia zabezpečenia Access Stratum. Rozobraté budú niektoré z viacerých zabezpečení.

Medzi jedno z viacerých zabezpečení sa zaraďujú poverovacie údaje a ich poskytovanie. Autentifikačné postupy NB-IoT sú založené na tom, že subjekt (napr. UE) najprv preukáže určitú totožnosť, aby potom druhá strana (napr. sieť) mohla overiť, že poverovacie údaje subjektu zodpovedajú tejto totožnosti. Existuje preto základný predpoklad, že identifikátor je jedinečný a trvalo priradený k určitému subjektu. Ak to tak nie je, potom môže byť akákoľvek autentifikácia tejto totožnosti potenciálne narušená.

Príkladom potenciálne narušiteľného identifikátora je International Mobile Equipment Identity (IMEI) používaná v sieťach 3GPP, vrátane NB-IoT. Protokol registrácie zabezpečuje, že sieť prijme IMEI poskytnuté mobilným zariadením. V teórii sú IMEI jedinečné, ale v realite sa objavujú falošné a duplikátne IMEI. Na rozdiel od toho, International Mobile Subscriber Identity (IMSI) vložená do modulu identity predplatiteľa 3GPP (SIM) alebo univerzálnej SIM (USIM) predstavuje spoľahlivý a jedinečný identifikátor. Certifikačné programy sú určené na to, aby zabezpečili, že samotná IMSI ako aj pridružený autentifikačný kľúč predplatiteľa Ki, sú bezpečne poskytnuté a uložené.

Druhým zabezpečením je tzv. ochrana identity. Niektoré protokoly zahŕňajú opatrenia na ochranu súkromia, ktoré minimalizujú používanie trvalo pridelených identifikátorov, ktoré by mohli byť zachytené a korelované s aktivitou zariadenia v priebehu času. Príkladom toho je Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI) pridelená sieťami 3GPP na adresovanie mobilného zariadenia namiesto IMSI, ktorá sa používa len vtedy, keď sa zariadenie pripája k sieti.

Tretím zabezpečením je integrita dát a jej kontrola. V NB-IoT existujú štyri algoritmy na ochranu dôvernosti a integrity: NULL (nevyužíva sa bezpečnostný algoritmus), SNOW3G (128-bitová šifra toku dát), AES (128-bitová bloková šifra v režime CTR) a ZUC (Zu Chongzhi) (128-bitová šifra toku dát). Na ochranu integrity sa používajú príkazy EAIx, pričom x označuje kód vybraného algoritmu. Aktivácia bezpečnostnej funkcie umožňuje systémom využívať tajné kľúče uvedené vyššie na vykonávanie šifrovania/odšifrovania. To umožňuje chrániť dôvernost a integritu správ RRC medzi UE a eNB, ako aj správ NAS medzi UE a zázemnými službami. Ochrana je založená na komunikačnej vrstve a je pre používateľov transparentná. V podstate je bezpečnosť postavená na predom distribuovanom tajnom kľúči uloženom v SIM karte.

Štvrtým zabezpečením je dôvernost dát. Dôvernost dát kontrolujú príkazy NAS. Pri tom sa používajú tie isté tri šifrovacie algoritmy založené na symetrickej kryptografii. Výber algoritmu je riadený parametrom EEAx príkazu.

### Autentizácia

Proces autentizácie UE v sieti NB-IoT/LTE sa vykonáva pomocou procedúry Authentication and Key Agreement (AKA). Celý proces možno rozdeliť na tri samostatné kroky, ktoré sú znázornené na Obr. 2.6. Ďalej sú v Tab. 2.7 uvedené všetky integritné/šifrovacie kľúče, ktoré sú pre túto procedúru relevantné.

Keď sa UE pokúša získať prístup do siete pri počiatočnom pripojení, správa s požiadavkou na pripojenie obsahujúca IMSI, schopnosti siete UE (t. j. podporované bezpečnostné algoritmy) a  $KSI_{ASME} = 7$  (identifikátor sady kľúčov) je doručená k entite riadenia mobility (MME).  $KSI_{ASME} = 7$  indikuje, že na UE nie je dostupný žiaden kľúč entity riadenia prístupovej bezpečnosti ( $K_{ASME}$ ). Keď MME prijme požiadavku na prístup, používateľ je identifikovaný pomocou jeho IMSI a je vydávaná požiadavka na Home Subscriber Server (HSS). Ako odpoveď HSS generuje sadu autentizačných vektorov  $AV = (RAND, XRES, AUTN_{HSS}, K_{ASME})$ . Odvodenie všetkých kľúčov v blokoch kryptografických funkcií v tomto kroku je založené na procedúre AKA využívajúcej algoritmy MILENAGE alebo TUAK. Prvý z nich je súborom matematických funkcií  $f_1, \dots, f_5$ , založený na symetrických kľúčových primitívach, konkrétne - AES-128 [27].

Generovanie  $K_{ASME}$  sa skladá z dvoch krokov pre oba UE a HSS. Pre UE je šifrovací kľúč (CK) a integritný kľúč (IK) odvodený z LTE kľúča (K), 48b sériového čísla (SQN) a náhodného čísla (RAND). LTE kľúč je uložený v USIM a nedá sa zmeniť, zatiaľ čo HSS generuje SQN a RAND. SQN však nie je priamo prenášané, ale je skryté v  $AUTN_{HSS}$ . UE, aby mohlo odvodiť späť SQN, prechádza RAND a LTE K na vstupe  $f_5$  (časť algoritmu MILENAGE) a výstup je potom XORovaný s  $AUTN_{HSS}$ , čo produkuje požadovanú hodnotu SQN.

Ďalej, v druhom kroku, CK a IK sú využívané na generovanie  $K_{ASME}$ , ktoré je kľúčové pre nasledujúce postupy.  $K_{ASME}$  je odvodené z CK, IK, SQN a identifikátora obslužnej siete (SN ID) prostredníctvom bezpečného hešovacieho algoritmu (HMAC SHA-256), ktorý sa tiež používa vo všetkých blokoch funkcie derivácie kľúčov (KDF) vo zvyšku systému.

Rovnaký postup generovania  $K_{ASME}$  sa vykonáva aj na HSS. V tomto prípade však sú LTE kľúč a IMSI poskytované Autentizačným centrom (AuC) [27].

Teraz sa porovnávajú autentizačné tokeny  $AUTN_{UE}$  generované UE a  $AUTN_{HSS}$  prijaté z MME. Ak autentizácia prebehne úspešne, RES je odoslaný do MME, kde sa očakávaný výsledok autentizácie (XRES) prijatý z HSS porovná s RES z UE. Po tomto procese sú UE a sieť navzájom autentizované a obidve zdieľajú rovnaký kľúč  $K_{ASME}$ , hoci skutočný kľúč nebol priamo prenesený vzduchom. Skutočná hodnota  $K_{ASME}$  je prenesená iba medzi HSS a MME v Authentication Vector (AV). Avšak v odpovedi môže byť generovaných viac ako jeden AV obsahujúci  $K_{ASME}$ . Preto je  $K_{ASME}$  nahradené  $KSI_{ASME}$  v autentizačnej žiadosti vymieňanej medzi MME a UE. Hodnota  $K_{ASME}$  potom slúži ako index  $K_{ASME}$  vo vyhľadávacej tabuľke uloženej na oboch, UE a HSS.  $K_{ASME}$  sa skladá z troch bitov, takže môžu byť použité hodnoty 1 – 7 (000 – 111 v binárnom formáte). Autentizačné vektory sú ďalej prenesené do MME a uložené. MME vyberie jeden z nich na vykonanie autentizačného procesu s UE. Ďalej, 128 b náhodné číslo RAND a autentizačný token  $AUTN_{HSS}$  sú odoslané z MME do UE, kde sú výsledok autentizácie (RES), autentizačný token ( $AUTN_{UE}$ ) a  $K_{ASME}$  vypočítané s využitím algoritmu EPS AKA [27].

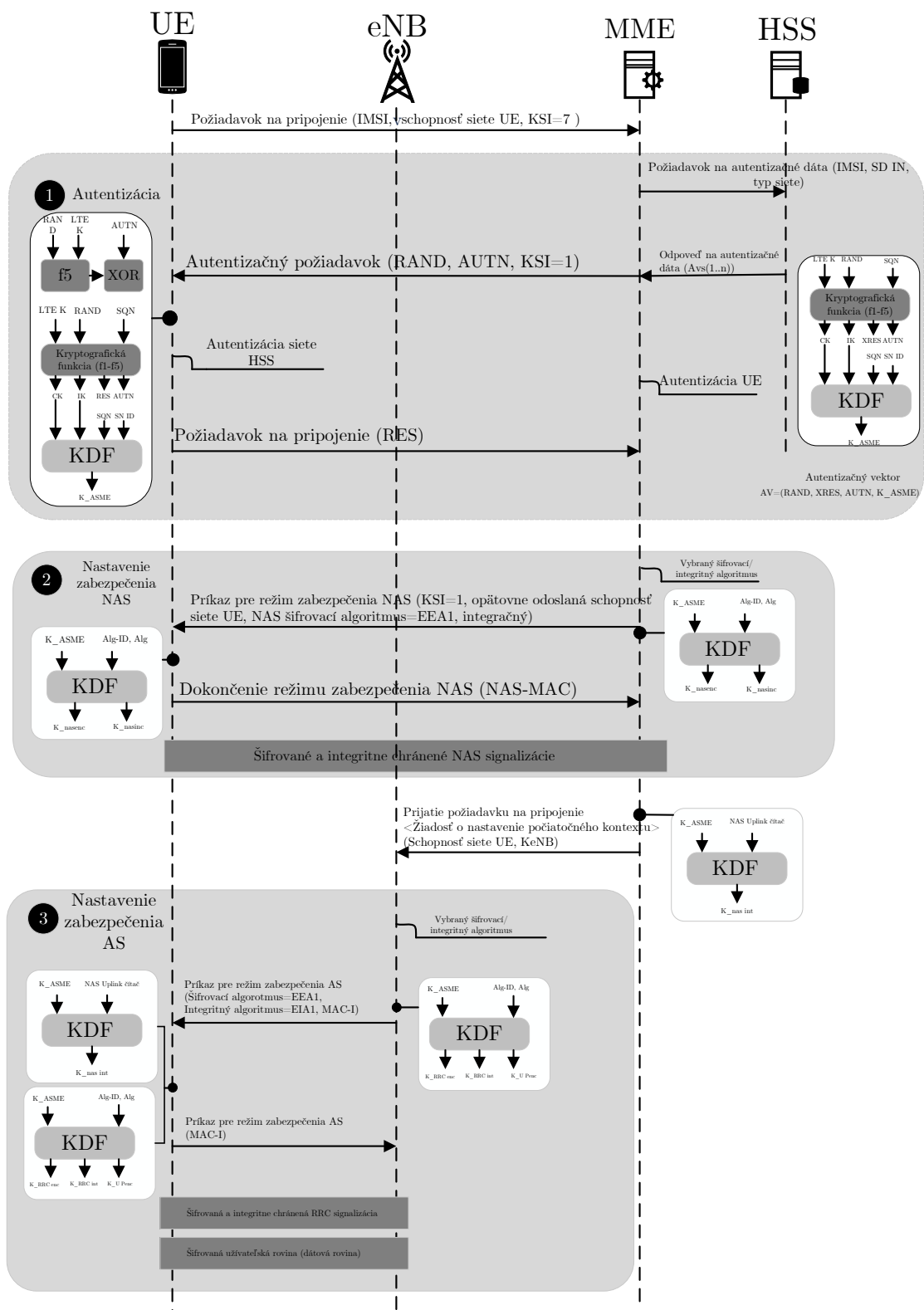
Ďalším krokom v autentizačnom postupe je nastavenie bezpečnosti NAS. V tomto postupe sú odvodené kľúče bezpečnosti NAS, ktoré budú počas signalizácie NAS použité, z  $K_{ASME}$ . Nastavenie bezpečnosti NAS pozostáva z výmeny správ Príkaz režimu bezpečnosti a Dokončenie režimu bezpečnosti medzi MME a UE. Celý proces začína, keď je správa Príkaz režimu bezpečnosti z MME doručená UE. Počas prvého kroku MME vyberá algoritmy bezpečnosti NAS (Alg-ID) a odvodzuje integritné ( $K_{NASint}$ ) a šifrovacie ( $K_{NASenc}$ ) kľúče z  $K_{ASME}$ . Ďalej MME aplikuje  $K_{NASint}$  na správu Príkaz režimu bezpečnosti, čím produkuje autentizačný kód správy (NAS-MAC). Autentizačný kód je generovaný využitím algoritmu EIA, ktorý vybral eNB. Neskôr MME prenáša správu, ktorá zahŕňa vybraný bezpečnostný algoritmus (Šifrovací algoritmus NAS - EEAx, Integritný algoritmus NAS - EIAx) a NAS-MAC do UE. Keďže UE ešte nie je oboznámené s vybraným šifrovacím algoritmom, je chránená iba integrita správy, ale nie je šifrovaná.

Keď je správa Príkaz režimu bezpečnosti doručená, integrita správy je overená UE použitím rovnakého algoritmu integrity, aký použil eNB. Zároveň UE využíva algoritmus integrity/šifrovania NAS na generovanie bezpečnostných kľúčov ( $K_{NASint}$  a  $K_{NASenc}$ ) z  $K_{ASME}$ . Neskôr je správa Dokončenie Príkazu režimu bezpečnosti

zašifrovaná (použitím algoritmu EEA, ktorý vybral eNB) s  $K_{NASenc}$  a autentizačný kód NAS-MAC je generovaný s využitím  $K_{NASint}$  a priložený k zašifrovanej správe. Nakoniec je zašifrovaná a integritou chránená správa odoslaná do MME. Keď je integrita prijatej správy overená a správa je dešifrovaná použitím bezpečnostných kľúčov ( $K_{NASint}$  a  $K_{NASenc}$ ), nastavenie bezpečnosti NAS je dokončené [27].

Keď je nastavenie bezpečnosti NAS dokončené, začína procedúra nastavenia bezpečnosti vrstvy prístupu (AS) medzi UE a eNB. Keďže však KAS ME nie je priamo prenesený do eNB, nemôže odvodiť  $K_{eNB}$ . MME preto generuje  $K_{eNB}$  z  $K_{ASME}$  a odosiela ho do eNB prostredníctvom správy Prijatie Pripojenia. Keď je  $K_{eNB}$  odvodený, môže pokračovať nastavenie bezpečnosti AS. Bezpečnosť AS zabezpečuje integritu a šifrovanie správ Riadenia Rádiových Zdrojov (RRC). Podobne ako bezpečnosť NAS, procedúra nastavenia bezpečnosti AS pozostáva z cesty späť a vpred RRC signalizačných správ (príkaz režimu bezpečnosti a dokončenie režimu bezpečnosti) a začína, keď je Príkaz režimu bezpečnosti doručený UE. Na eNB je vybraný algoritmus bezpečnosti AS (Alg-ID) a používaný na generovanie kľúča integrity ( $K_{RRCint}$ ) a kľúča šifrovania ( $K_{RRCenc}$ ).

Oba kľúče sú odvodené z  $K_{eNB}$  a použité pre integritu a šifrovanie RRC signalizačných správ. Tretí kľúč ( $K_{UPenc}$ ) je tiež odvodený z  $K_{eNB}$  a použitý na šifrovanie prenosov dát pre užívateľskú rovinu. Potom  $K_{RRCint}$  je aplikovaný na správu Príkaz režimu bezpečnosti, čo generuje autentizačný kód pre integritu (MAC-I) s využitím vybraného algoritmu EIA. Teraz je správa Príkaz režimu bezpečnosti obsahujúca vybraný algoritmus bezpečnosti AS a MAC-I prenesená do UE. Keď UE prijme správu, jej integrita je overená aplikovaním algoritmu integrity AS, ktorý vybral eNB. Ďalej, algoritmus integrity/šifrovania AS je použitý na generovanie bezpečnostných kľúčov AS ( $K_{RRCint}$ ,  $K_{RRCenc}$  a  $K_{UPenc}$ ). Nakoniec, správa Dokončenie Príkazu režimu bezpečnosti obsahujúca MAC-I je generovaná použitím kľúča integrity RRC a správa je odoslaná do eNB [27].



Obr. 2.6: Bezpečnostné vlastnosti najmodernejších technológií LPWA[27].

Tab. 2.7: Porovnanie bezpečnostných kľúčov LTE/NB-IoT[27].

Kľúč	Dĺžka [b]	Umiestnenie	Odvodené od	Popis
K	128	USIM HSS/AuC	-	EPS master kľúč
CK	128	USIM HSS/AuC	K	Šifrovaný kľúč
IK	128	USIM HSS/AuC	K	Integračný kľúč
$K_{ASME}$	256	UE, MME, HSS	CK,IK	Základný kľúč MME
$K_{eNB}$	256	UE, eNB, MME	$K_{ASME}$	Základný kľúč eNB
$K_{NASint}$	128/256	UE, MME	$K_{ASME}$	Integračný kľúč pre NAS správy medzi UE a MME
$K_{NASenc}$	128/256	UE, MME	$K_{ASME}$	Šifrovací kľúč pre NAS správy medzi UE a MME
$K_{RRCint}$	128/256	UE, eNB	$K_{eNB}$	Integračný kľúč pre RRC správy na SRB medzi UE a MME
$K_{RRCenc}$	128/256	UE, eNB	$K_{eNB}$	Šifrovací kľúč pre RRC správy na SRB medzi UE a MME
$K_{UPenc}$	128/256	UE, eNB	$K_{eNB}$	Šifrovací kľúč pre užívateľské IP pakety na DRB medzi UE a eNB

## 2.9 Privátne mobilné siete pre IoT

Mobilná Privátna Sieť (MPN) je mobilná sieť, kde sú všetky alebo niektoré komponenty alebo zdroje vyhradené pre podnikového zákazníka. Digitálna transformácia a Priemysel 4.0 generujú nové požiadavky od výroby, dopravy, energetiky/služieb, zdravotníctva a verejného sektora pre riešenia MPN, ktoré využívajú pokročilé bezdrôtové sieťové schopnosti.

Príkladmi sú priemyselné monitorovanie a kontrola, pripojení pracovníci a služby komunikácie novej generácie pre verejnú bezpečnosť [28].

Tradičné WiFi už nespĺňa požiadavky na bezpečnosť, pokrytie, kapacitu, nízku latenciu a záruky kvality služieb; preto je rastúci dopyt po MPN. Operátori majú v úmysle vybudovať bezpečné riešenie MPN pre svojich zákazníkov Voice Group Call Service on E-UTRAN (VGE) a Operating Company (OpCo). Riešenie by malo byť škálovateľné podľa kapacitných potrieb zákazníka, poskytovať rôzne úrovne spoľahlivosti podľa prevádzkových potrieb zákazníckeho podnikania a ponúkať zákazníkom merateľné úrovne výkonnosti pre beh ich aplikácií.

Okrem riešenia MPN zavádzajú operátori tiež schopnosť Push-to-Talk (PTT), ktorá bude nasadená v sieti MPN buď ako riešenie Over-the-top alebo ako riešenie PTT integrované so sieťou MPN, aby poskytovalo schopnosť kritickej komunikácie PTT podľa príslušných špecifikácií 3GPP.

Pre RAN je povinné použiť existujúceho dodávateľa verejného rádia v krajine pre nasadenie makra; na stopách a schváleného dodávateľa rádia pre nasadenie; mimo

stôp. Dôvodom sú zmluvné záväzky s existujúcimi dodávateľmi RAN pre nasadenie makier v existujúcej pôsobnosti dodávateľa RAN OpCo a tiež kvôli úvahám o O&M RAN. Ako v každom nasadení MPN, existuje možnosť nasadiť vyhradenú alebo zdieľanú RAN pre zákazníka prevádzkovaný operátorom (druhá možnosť je aplikovateľná len pre scenáre; na stopách) [28].

### **Izolované MPN**

Medzi kľúčové charakteristiky izolovanej MPN patrí:

- vyhradené jadro,
- vyhradená RAN alebo zdieľaná RAN operátor OpCo,
- vyhradené (súkromné) SIM karty,
- PLMN ID a rozsahy IMSI,
- rádio vysiela vyhradené PLMN ID a pripojenie pre diaľkovú správu (vrátane zabezpečenia SIM kariet).

### **Hybridné MPN**

Kľúčové charakteristiky hybridnej MPN sú nasledovné:

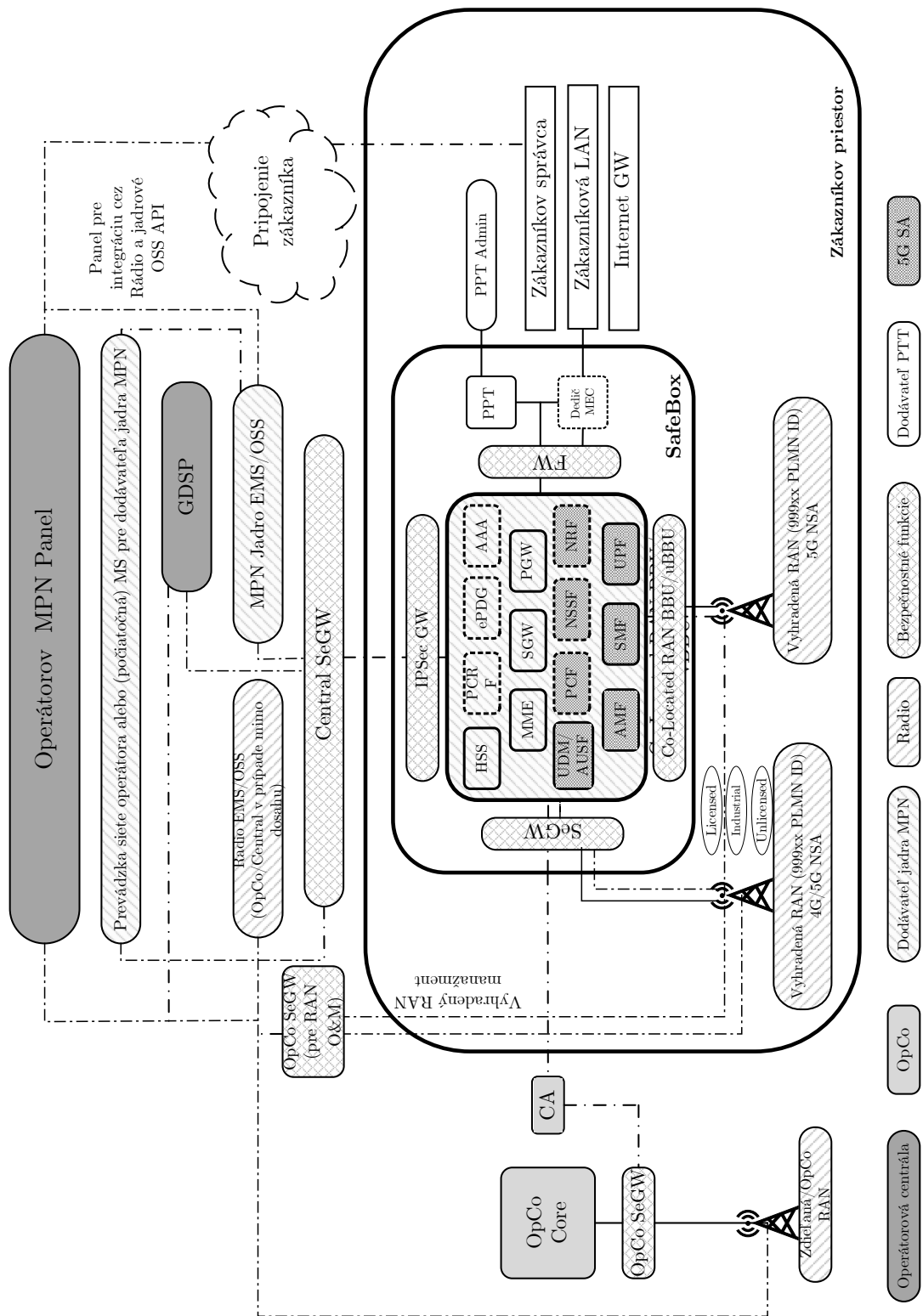
- špecifické nové vyhradené komponenty jadra pre lokálne výstupy dát na zákazníckych miestach,
- je prepojená/integrovaná do jadrovej siete operátora pre správu predplatného a prístup k operátorským službám,
- súkromní predplatitelia sú spravovaní buď cez lokálny OpCo alebo IoT HSS,
- rádiový komponent je buď výlučne vyhradený predplatiteľom zákazníka alebo je zdieľaný medzi verejnými a súkromnými predplatiteľmi.

### **Oddelované MPN**

Kľúčové charakteristiky oddelovanej MPN sú nasledovné:

- žiadne vyhradené komponenty jadra, t. j. používa sa existujúce jadro operátora,
- vyhradená RAN alebo zdieľaná RAN OpCo,
- vyhradené (rezervované) zdroje v sieti operátora, napríklad využitím sieťového slicing 5G,
- vyžaduje stopu OpCo.





Obr. 2.7: Architektúra izolovanej MPN [28].

## 2.9.1 Multi Operator Radio Access Network

Riešenie Multi Operator Radio Access Network (MORAN) umožňuje viacerým operátorom zdieľať len jeden uzol RAN (eNB/gNB) na rozdielnych zdrojoch nosnej vlny. Na rozdiel od MOCN, v MORAN operátori nemajú prístup k zdrojom buniek a frekvenčných pásiem zdieľanej RAN (t.j. operátor A využíva bunku A a operátor B využíva bunku B). Ďalší rozdiel, ktorý odlišuje MOCN od MORAN je, že zdieľaná RAN vysiela dve PLMN ID, napríklad v prípade MPN: jedno patrí jadru OpCo a druhé jadru MPN [28]. Je možné podporovať MOCN na základe MORAN, analýzy ukazujú, že z technického hľadiska je konfigurácia podporovaná a nie je potrebný žiadny ďalší HW, ale malo by sa skontrolovať, či neexistujú žiadne ďalšie obmedzenia kvôli zmluvnej dohode o zdieľaní.

V modeli MORAN sa zdieľa časť siete od antén základňových staníc až po RNC v prípade 3G sietí alebo eNodeB v prípade 4G sietí. Chrbticová sieť sa nezdieľa, tú má každý operátor vlastnú. Operátori v modeli MORAN zdieľajú svoje fyzické zariadenia, ale pokračujú vo využívaní svojich získaných frekvencií.

Každý operátor využíva svoje špecifické frekvenčné pásmo a má svoju časť siete s unikátnym PLMN kódom a identifikátorom bunky (Cell ID), ktoré sú neustále šírené v rámci broadcastu. To umožňuje zákazníkovi neustále vidieť logo ich operátora. Nie sú potrebné žiadne špeciálne koncové zariadenia, keďže kompatibilita je zabezpečená úplne. Zákazníci majú taktiež plný prístup k všetkým službám svojho operátora. Avšak pri zdieľaní siete nie je Cell ID dostatočné pre jednoznačnú identifikáciu, pretože musí byť unikátne len v rámci určitej oblasti siete označenej ako location area code (LAC). Pre absolútnu identifikáciu sa musí využiť cell global identity (CGI), ktoré musí byť jedinečné naprieč všetkými operátormi [28].

Realizácia MORAN vyžaduje koordinované úsilie všetkých zúčastnených strán, čo má vplyv hlavne na oddelenia ako plánovanie siete, údržba alebo aktualizácie softvéru. Je dôležité tiež rozhodnúť, ktoré základňové stanice na spoločnom území budú naďalej v prevádzke a dohodnúť sa na ďalších technických parametroch siete, ako je napríklad proces prepínania medzi bunkami (handover).

### Výhody modelu MORAN:

- kompatibilita koncových zariadení,
- dedikovaná šírka pásma,
- rýchlejšie budovanie siete,
- nezávislá chrbticová sieť,
- vlastné služby a PLMN kód,
- nízke prevádzkové náklady,
- zníženie nákladov pri plánovaní a výstavbe.

### **Nevýhody modelu MORAN:**

- nutnosť koordinácie medzi operátormi,
- stále vysoké náklady pri dražbe frekvencií.

Model MORAN je ideálny pre oblasti s nižšou alebo strednou hustotou osídlenia, teda pre regióny s obmedzeným alebo stredným komerčným potenciálom. V takýchto oblastiach môže model priniesť významné úspory nákladov, umožňuje rýchlejšie rozširovanie siete a zjednodušuje splnenie cieľov rozvoja. Ak dôjde k zvýšeniu dopytu po sieťových službách, k rozporom medzi operátormi, alebo k akýmkoľvek iným zmenám, nie je vylúčené opustenie modelu MORAN a návrat k samostatnému prevádzkovaniu sietí.

## **2.9.2 Multi Operator Core Network**

Riešenie Multi Operator Core Network (MOCN) umožňuje viacerým operátorom zdieľať jednu rádiovú bunku na základe spoločných zdrojov nosnej vlny. Operátori majú tiež prístup k zdrojom buniek a frekvenčných pásiem zdieľanej RAN. Tieto zdroje RAN môžu byť medzi operátormi zdieľané v rôznych pomeroch.

Pri poslednej spomenutej vlastnosti nastáva hlavný rozdiel medzi modelom MOCN, teda multi-operátorovou jadrovou sieťou, a modelom MORAN. V oboch prípadoch sa zdieľa časť siete, ale v prípade MOCN sa navyše zdieľa pridelené spektrum. Miestny regulátor musí povoliť zdieľanie spektra, čo v prípade Českej republiky vyžaduje súhlas Českého telekomunikačného úradu [28, 29].

Ak však oba operátori vlastnia vlastné spektrum, môžu ho zlúčiť a dosiahnuť tak vyššiu prenosovú kapacitu. Tým sa kapacita siete využije efektívnejšie. Operátori s prideleniami frekvencií na okraji vymedzeného spektra tak majú určitú nevýhodu. Zdieľanie spektra však prináša aj svoje nevýhody. Vyššia prevádzková záťaž siete od zákazníkov jedného operátora sa za normálnych okolností prejaví v zvýšenej prevádzkovej záťaži siete všetkých operátorov zúčastňujúcich sa na zdieľaní. Dostupná kapacita sa tak delí medzi zákazníkov všetkých operátorov. Na vyriešenie tohto problému je potrebné použiť mechanizmus pre spravodlivé rozdelenie prenosovej kapacity. Je dôležité správne smerovať užívateľské aj služobné dáta na správnu chrbticovú sieť, respektíve na chrbticovú sieť správneho operátora. Okrem toho, k spomenutému mechanizmu pre spravodlivé zdieľanie prenosovej kapacity je vždy potrebné správne určiť, ktorému operátorovi patria prenášané dátové prenosy. MOCN je možné realizovať vďaka zahrnutiu viacnásobného PLMN ID (multiple PLMN IDs) v broadcaste [28, 29].

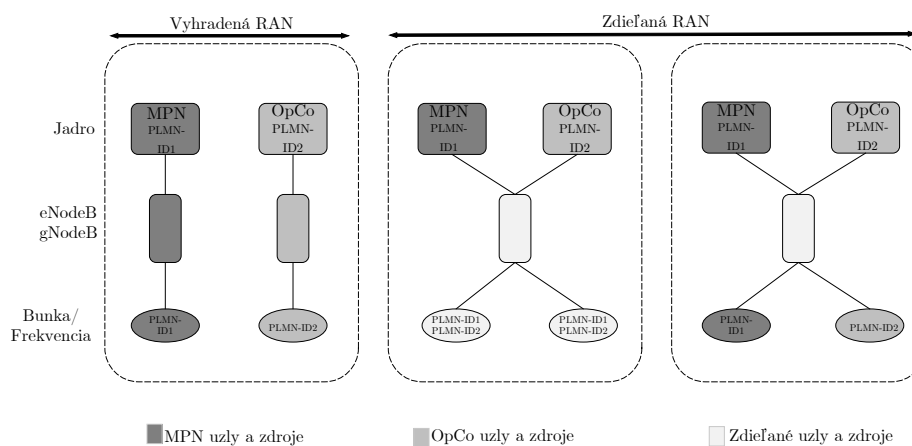
### Výhody modelu MOCN:

- spektrá oboch operátorov je možné spojiť,
- nízke prevádzkové náklady,
- rýchlejšie budovanie siete,
- nezávislá chrbticová sieť,
- výrazné zníženie nákladov pri plánovaní a výstavbe.

### Nevýhody modelu MOCN:

- hardwarové nároky,
- nutný vyšší vysielací výkon,
- zložité aplikovanie QoS,
- zdieľané spektrum musí povoliť miestny regulátor,
- vyššia záťaž siete u jedného operátora môže znamenať vyššiu záťaž siete u všetkých operátorov.

Tu je podrobnejší rozpis pre vyhradenú RAN (používaný pre izolovanú možnosť MPN číslo 1), MOCN (používaný pre izolovanú možnosť MPN číslo 2) a MORAN:



Obr. 2.8: Vyhradená RAN vs. MOCN vs. MORAN [28].

Tab. 2.8: Porovnanie vyhradenej RAN, MOCN, MORAN [28].

Komponent	Vyhradená RAN	Zdieľaná OpCo RAN (MOCN)	Zdieľaná OpCo RAN (MORAN)
EPC/5GC	Vyhradená	Vyhradená	Vyhradená
Frekvenčné spektrum	Vyhradená	Zdieľaná	Vyhradená
RAN (eNB/gNB)	Vyhradená	Zdieľaná	Zdieľaná
Pokrytie bunky	Vyhradená	Zdieľaná	Vyhradená
PLMN ID	MPN PLMN (999XX)	OpCo+MPN PLMN (jedna bunka)	OpCo / MPN PLMN (jedna bunka)

## 3 Long Term Evolution Machine Type Communication

V nasledujúcej kapitole bude bližšie charakterizovaná technológia LTE Cat-M, ktorá je uplatňovaná v IoT. V kapitole bude bližšie popísaná LTE Cat-M technológia, jej komunikačné scenáre, frekvenčné pásma, operačné módy a architektúra siete.

### 3.1 Úvod

Technológia LTE Cat-M bola špecifikovaná v 3GPP Vydaní 13 a následne v ďalších nadchádzajúcich 3GPP Vydaniach 14 a 15. Jedná sa o úpravu aktuálnej LTE technológie pre implementáciu v Low-power wide-area network (LPWAN) sieťach pre možnosť pracovať v režime machine-to-machine (M2M) komunikácie a v IoT [30, 31]. Technológia využíva súčasnú LTE komunikačnú technológiu, no uplatnenie má skôr v GSM pásme. Výhodou je možnosť využitia už vybudovanej a funkčnej architektúry.

LTE Cat-M využíva pri prenose správ rozličné modulácie. Pre prenos v Uplinku využíva SC-FDMA moduláciu a pri Downlinku využíva OFDMA moduláciu [32].

LTE Cat-M je technológia vychádzajúca z výhod LTE zabezpečenia a prináša niekoľko výhodných vlastností [30]:

- **Podpora identifikácie užívateľa** - umožňuje jednoznačnú identifikáciu užívateľa.
- **Autentifikácia užívateľa** - technológia zabezpečuje, že komunikujúce zariadenia sú autentizované a overené na vzájomnú komunikáciu.
- **Autentifikácia užívateľského zariadenia** - zabezpečuje autentifikáciu samotného zariadenia.
- **Integrita prenášaných údajov** - ochraňuje prenášané údaje pred neoprávneným prístupom a zaručuje neporušiteľnosť prenášaných údajov.

Technológia LTE Cat-M so svojimi výhodami predstavuje značný prínos a ponúka potenciál pre nasledujúce typy aplikácií [30]:

- **Sledovacích zariadení** - technológia je ideálna pre sledovanie pohybu, pozície objektov a osôb.
- **Chytrých miest** - pomáha pri implementácii inteligentných riešení pre mestá napr. monitorovanie dopravy alebo parkovania.
- **Chytrých domácností** - pripojením rôznych zariadení v domácnosti vytvára inteligentné domácnosti.



Obr. 3.1: Logo technológie LTE Cat-M [33].

## 3.2 Komunikačné scenáre

V tejto podkapitole sú rozobrané kľúčové oblasti využitia a predstavené reálne príklady aplikácií. Technológia v porovnaní s bežnými mobilnými technológiami ponúka výhody, ako sú dlhá životnosť batérie, lepšia penetrácia signálu do budov a nižšie náklady na zariadenie. Tieto charakteristiky robia z LTE Cat-M ideálnu voľbu pre mnohé aplikácie, vrátane tých v zdravotníctve, priemysle a doprave. Následne sa pozrieme na konkrétne využitie LTE Cat-M v rôznych odvetviach, vrátane jeho potenciálu a významu v zlepšovaní našich každodenných životov.

V nasledujúcich troch odstavcoch sú rozobraté reálne využitia LTE Cat-M.

Prvým praktickým využitím technológie je jej aplikácia v inteligentných nemocniciach. Nositeľné zariadenia ako fitness náramky, smart hodinky a inteligentné oblečenie majú schopnosť monitorovať a sledovať polohu a pohyb pacienta, a zároveň poskytovať funkcie identifikácie a autentifikácie. Tieto zariadenia dokážu zbierať dáta a snímať životné funkcie pacienta, vrátane tepovej frekvencie, krvného tlaku a telesnej teploty. V prípade potreby môžu byť použité aj implementovateľné prístroje, ako sú kardiostimulátory a defibrilátory, na monitorovanie srdcovej činnosti, alebo špeciálne senzory na sledovanie konkrétnych častí orgánov, ako sú napr. (pľúca alebo obličky). Táto technológia, využívajúca LTE Cat-M, poskytuje rýchly a efektívny prenos dát, vysokú energetickú účinnosť a široké pokrytie komunikačnými signálmi, čo zabezpečuje spoľahlivý výkon. Jej presné lokalizačné schopnosti umožňujú efektívnu klinickú starostlivosť priamo v nemocnici, ale aj poskytovanie diaľkovej starostlivosti o pacientov [4].

Druhé praktické využitie je v oblasti inteligentných budov a domácností. Hlavným cieľom filozofie inteligentných budov a domácností je šetrenie energie. LTE Cat-M ponúka výkonný a flexibilný spôsob, ako ovládať a monitorovať rôzne aspekty domácnosti, čím poskytuje pohodlie, redukciu spotreby energie a zvýšenú bezpečnosť. Umožňuje nasadenie zariadení v takmer všetkých miestnostiach budovy. Príkladom využitia je ovládanie osvetlenia na diaľku, nastaviteľné vykurovanie alebo časovo nastaviteľné zatiahnutie žalúzií [4].

Tretím praktickým využitím sú kamery pre video dohľad. Využitie video dohľadu je realizovateľné špecificky prostredníctvom technológie LTE Cat-M, vďaka jej schopnosti poskytovať vysokorýchlostný prenos dát. Na rozdiel od toho technológia NB-IoT takúto funkcionálnosť nepodporuje, a preto nie je vhodná pre aplikácie vyžadujúce prenos videa v reálnom čase alebo vysokokvalitného video obsahu. Inteligentné budovy, firmy a priemyselné objekty čoraz častejšie inštalujú kamery pre dohľad nad objektom. Príkladom je LTE-M kategória zariadení Cat-M2 podporujúca multimediálne IoT aplikácie, ako sú hlas a video, ktoré majú maximálnu veľkosť prenosového bloku (TBS) 4008 bitov pri downlinku a 6968 bitov pri uplinku, čo je vhodné pre aplikácie video dohľadu [4].

### 3.3 Frekvenčné pásma

LTE Cat-M technológia pracuje vo frekvenčných pásmach, ktoré boli definované v 3GPP Vydaní 13 a následne v 3GPP Vydaní 14. V prvom zo spomínaných (3GPP Vydanie 13) bolo definovaných 19 frekvenčných pásiem.

Jedná sa o pásma : 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 18, 20, 26, 27, 28, 31, 39. Následne (3GPP Vydanie 14) boli pridané len dve frekvenčné pásma pre využitie LTE Cat-M a to pásma 25 a 40.

Na dosiahnutie globálnej podpory frekvenčných pásiem bolo z vyššie spomínaných pásiem vybratých 11. Zjednotenie využívaných pásiem má výhodu v jednotných moduloch možných operovať v Severnej Amerike, Južnej Amerike a taktiež v Európe a Ázii. Využívanými pásmami v týchto lokalitách boli vybrané pásma : 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13, 20, 25, 26 a 28 [34].

Tab. 3.1: Tabuľka jednotlivých pásiem a ich frekvenčného rozsahu pre uplink a downlink [35].

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

## 3.4 Operačné módy

Nasadenie LTE-M možno realizovať „in-band“ s využitím toho istého spektra a rádiového hardvéru ako štandard LTE, alebo „stand alone“ v oddelenom spektre. Táto technológia využíva existujúcu technológiu LTE so šíreným spektrom, ktoré je postačujúco robustné a poskytuje vysoký stupeň pokrytia. Keďže je postavená na zavedenom štandarde LTE, ponúka kompatibilitu a škálovateľnosť v rámci existujúcich infraštruktúr mobilných sietí. Pokrýva širokú škálu prípadov použitia, čím predstavuje atraktívnu ponuku pre výrobcov zariadení a poskytovateľov služieb, ktorí chcú využiť všadeprítomnosť sietí LTE. S LTE-M môžu zariadenia priamo komunikovať so 4G sieťou bez potreby brány, čo uľahčuje nasadzovanie aplikácií IoT. Zahŕňa to rôzne IoT zariadenia, od tých, ktoré vyžadujú nízku energiu a širokú pásma, ako sú senzory a merače, až po tie, ktoré potrebujú vyšší prietok dát, ako napríklad nositeľné zariadenia a inteligentné spotrebiče. Táto univerzálnosť spolu s nižšími nákladmi na moduly LTE-M v porovnaní s tradičnými LTE modulmi umožňuje nákladovo efektívne a rozsiahle nasadenie IoT riešení [36].

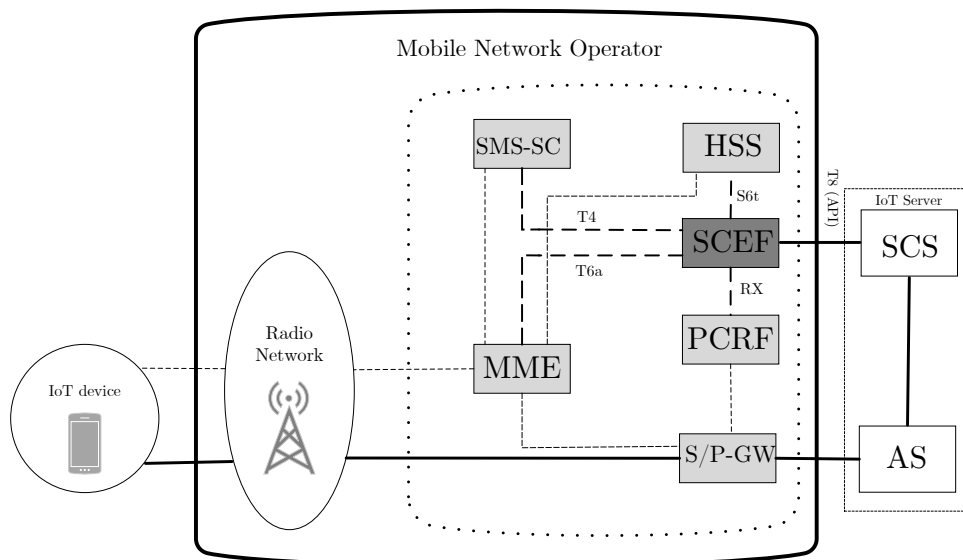
## 3.5 Architektúra siete

LTE Cat-M má veľmi podobnú architektúru založenú na LTE. Je pomerne plochý štandard založený na internetovom protokole IP, ktorý výrazne zvyšuje výkon 3G z hľadiska multimediálnych aplikácií. Sieť Radio Access Network (RAN) s názvom eUTRAN/eNodeB využíva prístup s frekvenčným delením jednej nosnej pre uplink a výkonnejší ortogonálny frekvenčný delený viacnásobný prístup pre downlink.

Jadro paketu je označené ako vylepšené jadro paketu EPC. Integrovaná základňová stanica/ovládač eNodeB poskytuje rádiový prístup, rádiový nosič a funkcie správy pre zariadenie LTE. EPC spracováva rôzne typy prevádzky užívateľov a zariadení. Podporuje zavádzanie nových zariadení, aplikácií a poskytuje podporu pre bezproblémovú mobilitu a presnosť cez bezdrôtové IP siete [37].

Dátové kanály sú v LTE formulované pomocou zdrojových blokov (RB) štandardizovaných s frekvenčným pásmom 180 kHz. Jedna milisekunda Transmission Time Interval (TTI) predstavuje najmenšiu jednotku času, v ktorej je základňová stanica (eNodeB) schopná plánovať prenos dát pre ľubovoľného používateľa v smeroch uplink alebo downlink. V prípade, že používateľ prijíma downlink dáta, eNodeB prideluje počas jednej milisekundy zdroje a informuje užívateľa cez Physical Downlink Control Channel (PDCCH), kde má hľadať svoje downlink dáta. V prípade chýb v prijatých paketoch sa využíva proces Incremental Redundancy Hybrid Automatic Repeat reQuest (IR-HARQ) [38].





Obr. 3.2: Architektúra LTE-M[39].

## 3.6 Šetriace režimy

Režimy šetrenia a úspory energie sú veľmi dôležité vo využití v IoT. Hlavným cieľom šetrenia energie a využitia batérie ako zdroja energie fyzických zariadení je dosiahnuť čo najdlhšiu životnosť batérie.

### 3.6.1 Power Saving Mode

V súčasnosti sa na šetrenie energie využíva režim PSM. PSM účinne vypína monitorovanie inštancií stránkovania v zariadení (každých 2,56 sekundy) a predlžuje časové intervaly zariadení, ktoré posielajú periodické aktualizácie sledovacej oblasti Periodic Tracking Area Update (pTAU). Výsledkom je, že zariadenie dokáže ušetriť prúdové zaťaženie batérie znížením signalizácie medzi zariadením a sieťou. Zavedením PSM môžu rádiové moduly prejsť do stavu HIBERNATE (stav vybitej batérie), keď sa neodosielaajú údaje, aby sa čo najefektívnejšie využila životnosť batérie [34].

PSM disponuje dvoma časovačmi [34]:

- T3324 Active Timer - definuje čas, počas ktorého je zariadenie v Active/IDLE móde. Tento časovač poskytuje dva druhy nastavenia. Nižšia nastavená hodnota časovača poskytuje väčšiu úsporu energie vďaka možnosti skoršieho prechodu do HIBERNATE stavu. Vyššia nastavená hodnota časovača poskytuje dlhší časový úsek umožňujúci komunikáciu zariadenia a servera. Výhodou časovača T3324 je možnosť nastavenia hodnoty, ktorá vyhovuje užívateľským

požiadavkám.

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

Odporúčané hodnoty T3412 časovača sú:

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

Spomenuté hodnoty sú len odporúčané a je možné ich kedykoľvek meniť.

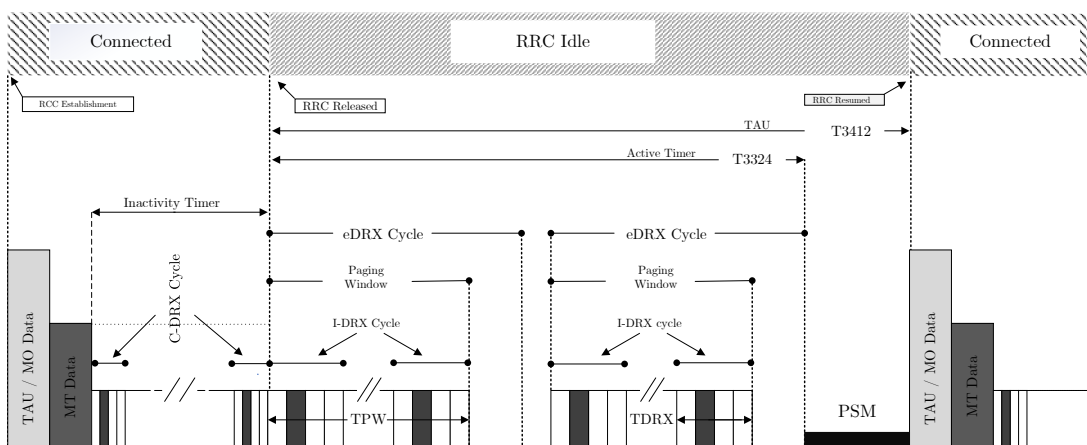
### 3.6.2 Extended Discontinuous Reception

Rozšírený eDRX predstavuje vylepšenú verziu existujúcej techniky DRX, ktorá je momentálne využívaná v LTE technológiách na účely šetrenia energie v mobilných zariadeniach [34, 40]. Hlavným zameraním eDRX je poskytnúť efektívne riešenie pre IoT aplikácie. Táto metóda spočíva v predĺžení obdobia, počas ktorého zariadenie neposiela a neprijíma dáta zo siete, a je v režime neaktivity. Výhodou eDRX je výrazné zvýšenie úspory energie, čo v konečnom dôsledku významne predlžuje životnosť batérie, čo je v IoT prostredí veľmi žiaduce [34]. Treba však mať na pamäti, že počas tohto obdobia je zariadenie nedostupné pre sieť.

Cyklus eDRX určuje základnú dostupnosť zariadenia v downlinku. eDRX je možné konfigurovať pomocou Paging Transmission Window (PTW), ktoré definuje spoľahlivosť dostupnosti zariadenia sieťou. Zariadenie má schopnosť kedykoľvek podľa potreby začať vysieláť dáta bez ohľadu na to, ako je eDRX nastavené.

Odporúčané hodnoty cyklu eDRX sú:

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



Obr. 3.3: Prehľad šetriacich režimov [40, 41].

## 3.7 Definícia podľa 3GPP Vydania

V dobe rýchlo sa rozvíjajúceho sveta internetu vecí (IoT) a potreby pripojenia rôznych zariadení k sieti, organizácia 3rd Generation Partnership Project (3GPP) hrá kľúčovú úlohu vo vývoji a štandardizácii komunikačných protokolov. Kapitola venovaná 3GPP Vydaniám sa zameriava na detailný pohľad na túto sériu Vydania štandardov, ktoré definujú technické špecifikácie a protokoly pre mobilné siete vrátane tých, ktoré podporujú LTE Cat-M. V tejto podkapitole sú bližšie rozobraté kľúčové prvky a inovácie, ktoré tieto Vydania priniesli v oblasti LTE Cat-M, a ako tieto zmeny ovplyvňujú vývojárov, poskytovateľov služieb a koncových užívateľov. Okrem toho sa venuje aj budúcemu smerovaniu a očakávaniam v oblasti štandardov 3GPP a ich úlohe pri formovaní budúcnosti IoT komunikácie.

### 3.7.1 Definícia podľa 3GPP Vydanie 13

Vydanie 13 prinieslo rad významných vylepšení a inovácií v oblasti mobilnej komunikácie, vrátane pokrokov pri podpore IoT. Jednou z hlavných súčastí tohto Vydania bola špecifikácia pre LTE Cat-M (Category M1), ktorá bola navrhnutá špeciálne na podporu nízkopriepustných a energeticky účinných aplikácií IoT. Vydanie prinieslo zjednodušenie modemového zariadenia čo viedlo k nižším výrobným nákladom.

To umožnilo masové nasadzovanie IoT zariadení. Vydanie prinieslo vylepšenia v oblasti energetickej účinnosti, vďaka čomu môžu zariadenia v sieti LTE Cat-M dlhšie fungovať na jednu batériu. To je kľúčové pre aplikácie IoT, ktoré môžu byť umiestnené na odľahlých alebo ťažko prístupných miestach, a s tým spojený lepší dosah signálu. Ponúka relatívne nízku latenciu pre aplikácie vyžadujúce rýchlejšiu odozvu. Taktiež podporuje hlasovú komunikáciu a mobilitu [38, 42].

### 3.7.2 Definícia podľa 3GPP Vydanie 14

Vylepšenia vydania 14 zahŕňa zvýšenú dátovú priepustnosť, podporu multicastu, vylepšenie polohy, optimalizáciu hlasu, zariadenie Cat-M2, vylepšenú podporu mobility a zníženie spotreby energie. Pre zariadenia LTE Cat-M2 triedy A sa pásmo zvyšuje na 5 MHz, zatiaľ čo LTE Cat-M2 triedy B zostáva pásmo 1,4 MHz.

Vydanie 14 je nazývané aj ako further enhanced Machine Type Communication (feMTC) a pridáva pásma 25 a 40. Zahŕňa ďalšie funkcie na zvýšenie rýchlosti dát a zníženie latencie pre veľkosť transparentného bloku a viac procesov Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ). Jednobunkový multicast sa používa na jednoduché bezdrôtové aktualizácie firmvéru a umiestnenie zariadenia na sledovanie polohy objektu [38, 42].

Tab. 3.2: Technické špecifikácie a vylepšenia pre LTE Cat-M Vydanie 13, 14 [38, 42].

	<b>Vydanie 13</b>	<b>Vydanie 14</b>
Info	Zavedenie	Vylepšenie LTE Cat-M1
Duplexný režim	FDX / HDX	FDX / HDX
Max. rýchlosť DL [Mb/s]	1	4
Max rýchlosť UL [Mb/s]	1	7
Latencia [ms]	10 - 15	10 - 15
Počet antén	1	1
Prijímacie pásmo [MHz]	1.08	5
Reťazce prijímača	1 (SISO)	1 (SISO)
Výkon vysieláča zariadenia [dBm]	20 / 23	20 / 23
Spotreba energie	Minimálna	Nižšia spotreba energie s vylepšeniami
Dátové rýchlosti [Mb/s]	-	4 DL / 7 UL
Kapacita bunky	-	Non-Anchor Paging a Non-Anchor RACH
Mobilita	-	Vylepšená s opätovným zavedením RRC spojenia pre neprerušenu komunikáciu
Určovanie polohy	-	E-CID a OTDOA
Podpora multicastu	-	Podporovaný
Mobility medzi frekvenciami	-	Pre medzifrekvenčné merania
Podpora VoLTE	-	Podporovaná
Podpora určovania polohy	-	Podporované
Vyššie dátové rýchlosti	-	Podporované
Podpora VoLTE	-	Podporované
Nové triedy výkonu	-	Zavedené

### 3.7.3 Definícia podľa 3GPP Vydanie 15

Vydanie 15 sa zameriava na zlepšenie latencie, spektrálnej účinnosti a zníženie spotreby energie. Nižšia latencia sa dosahuje skrátením času získavaním údajov zo systému a podporou včasného získavania údajov prenosu dát. Spektrálna účinnosť systému, a tým aj jeho kapacita, sa zvyšuje pri downlinku prostredníctvom použitia vyššieho rádu modulácie (64 QAM) a pri uplinku prostredníctvom precíznejšieho pridelovania zdrojov s jemnejšou granularitou. Na zníženie spotreby energie sa zavádzajú ďalšie funkcie ako signály prebudenia, nové synchronizačné signály alebo vylepšená spätná väzba HARQ. Okrem toho je zavedený nový dizajn rádiového budenia s nízkou spotrebou energie, monitorovanie opätovného výberu bunky, semi-perzistentné plánovanie a nižšie triedy vysielacieho výkonu. Dodatočné vylepšenia zahŕňajú riadenie zataženia na základe triedy prístupu s režimom zakázaného prístupu. Dôraz sa kladie na podporu spektra TDD s cieľom poskytnúť ďalšiu flexibilitu pri implementácii [43].

Tab. 3.3: Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 15 [43].

Vydanie 15	
Maximálna dátová rýchlosť DL/UL [kb/s]	300 / 375
Podpora pásma	Podpora menších pásiem (1,4 MHz)
Energie úsporné režimy	PSM, eDRX
Latencia	Vyššia (vhodná pre IoT)
Podpora mobility	Základná
Podpora VoLTE	Obmedzená alebo žiadna
Kódovanie a modulácia	QPSK
Spätná kompatibilita	Kompatibilná s LTE
Podpora zariadení	Zameraná na jednoduchšie IoT zariadenia
Bezpečnosť	Základná bezpečnosť LTE
Rozšírenie pokrytia	Vylepšené pokrytie
Podpora multicastu	Obmedzená
Frekvenčná efektívnosť	Štandardná
Podpora pre súčasné pripojenia	Obmedzené
Podpora pre krátky paketový prenos	Nízka podpora
Geolokačné služby	Základné
Podpora pre rôzne IoT protokoly	Obmedzená

### 3.7.4 Definícia podľa 3GPP Vydanie 16

Vydanie 16 prináša niekoľko nových funkcií, medzi ktoré patrí zvýšená spektrálna účinnosť pre MTC prenosy a znížená spotreba pre MTC zariadenia. Tie prinášajú vylepšený prenos údajov s predčasným ukončením iniciovaný zo strany telefónu,

signalizáciu pre budenie skupiny UE. Odosielanie v uplink smere pomocou predkonfigurovaných zdrojov v pohotovostnom režime, čo umožňuje zariadeniu vyhnúť sa časovo náročným postupom náhodného prístupu. Vylepšenie hlásenia o kvalite príjmu zo zariadenia v pohotovostnom aj pripojenom režime. Medzi ďalšie vylepšenia patrí uvoľnenie požiadavok na meranie hlavnej bunky pre zariadenia s nízkou mobilitou a vylepšenia výkonu pre bežné zariadenia LTE Cat-M [43].

Tab. 3.4: Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 16 [43].

Vydanie 16	
Maximálna dátová rýchlosť DL/UL [kb/s]	2000 / 2000
Podpora pásma	Rozšírená podpora pásiem
Energie úsporné režimy	Vylepšené PSM a eDRX
Latencia	Nižšia (lepšia pre real-time aplikácie)
Podpora mobility	Vylepšená
Podpora VoLTE	Vylepšená
Kódovanie a modulácia	QPSK a 16-QAM
Spätná kompatibilita	Kompatibilná s LTE a 5G NSA
Podpora zariadení	Podpora zložitejších zariadení a aplikácií
Bezpečnosť	Rozšírené bezpečnostné funkcie
Rozšírenie pokrytia	Optimalizované pre širšie pokrytie
Podpora multicastu	Rozšírená
Frekvenčná efektívnosť	Vylepšená s lepším využitím spektra
Podpora pre súčasné pripojenia	Vylepšená s vyšším počtom súčasných pripojení
Podpora pre krátky paketový prenos	Vylepšená podpora pre efektívny prenos krátkych správ
Geolokačné služby	Vylepšené s presnejším určovaním polohy
Podpora pre rôzne IoT protokoly	Rozšírená, vrátane lepšej podpory pre IP a ne-IP komunikáciu

### 3.7.5 Definícia podľa 3GPP Vydanie 17

Podľa správ 5G Americas uviedla, že aktivity 3GPP Vydanie 17 týkajúce sa LTE budú relatívne obmedzené z dôvodu rastúcej zrelosti technológie rádiového prístupu LTE. Vydanie 17 sa teda zameriava na ďalšie vylepšenia v oblasti pre masívne aplikácie MTC. Cieľom je ďalej rozširovať prípadné použitia LPWA.

Vydanie zahŕňa zvýšenie maximálnej veľkosti bloku prenosu pre downlink na 1736 a možnosť pre 14 procesov HARQ pre half-duplex, kde je cieľom umožniť vyššie maximálne rýchlosti [44].

Tab. 3.5: Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 17 [44].

Vydanie 17	
Zameranie	Zamerané na vylepšenia pre masívne MTC aplikácie a rozširovanie LPWA použití
Prenosové rýchlosti	Zvýšenie maximálnej veľkosti bloku prenosu pre downlink na 1736, možnosť pre 14 procesov HARQ pre half-duplex
Mobilita	-
Multicast	-
Efektívnosť využitia zdrojov	-
Polohovanie	-
Zníženie zložitosti	-
Výkon a Útlm	-

### 3.7.6 Definícia podľa 3GPP Vydanie 18

Vydanie 18 prináša zvýšenie pokrytia fyzických náhodných prístupových kanálov a prácu na zvýšení limitu výkonu UE a zníženie maximálneho útlmu výkonu alebo pomeru špičkového ku priemernému výkonu. Taktiež prináša zavedenie mechanizmov pre medzibunkovú mobilitu založenú na vrstve 1 (L1). Ďalšou hlavnou prácou na mobilite je rozšírenie podpory podmieneného handoveru. V prípade podmieneného handoveru UE obdrží príkaz na prepojenie s určitou podmienkou zo strany siete a tento príkaz sa vykoná až vtedy, keď je táto podmienka splnená.

Vydanie 18 rozšíri podporu multicastu aj pre koncové zariadenia v neaktívnom stave RRC, zavedie vylepšenia, ktoré umožnia koncovým zariadeniam v pripojenom stave RRC prijímať broadcastové služby a unicastové služby súčasne, a skúmať mechanizmy na zlepšenie efektívnosti využitia zdrojov v scenároch zdieľania RAN. Taktiež preskúmava riešenia na ďalšie zlepšenie presnosti, integrity a energetickej efektívnosti pri polohovaní, bude študovať polohovanie cez sidelink a skúmať podporu polohovania pre zariadenia RedCap [45].

Tab. 3.6: Technické špecifikácie pre LTE Cat-M Vydanie 18 [45].

Vydanie 18	
Zameranie	Zvýšenie pokrytia a zlepšenie výkonnosti UE, pracuje na zvýšení limitu výkonu a znížení maximálneho útlmu
Prenosové rýchlosti	Optimalizácia dátových rýchlostí a efektívnosti prenosu pre rôzne IoT aplikácie
Mobilita	Zavedenie L1 medzibunkovej mobility, rozšírenie podpory podmieneného handoveru
Multicast	Rozšírená podpora multicastu aj pre zariadenia v neaktívnom stave RRC a súbežné prijímanie broadcastových a unicastových služieb
Efektívnosť využitia zdrojov	Zlepšenie efektívnosti využitia zdrojov v scenároch zdieľania RAN
Polohovanie	Pokročilé riešenia pre zlepšenie presnosti a energetickej efektívnosti pri polohovaní, podpora polohovania pre zariadenia RedCap
Zníženie zložitosti	Snaha o ďalšie znižovanie zložitosti RedCap UE, zjednodušenie používania a zvyšovanie dostupnosti
Výkon a Útlm	Práca na zvýšení limitu výkonu UE a zníženie maximálneho útlmu výkonu

## 3.8 Bezpečnosť

Technológia LTE Cat-M je navrhnutá tak, aby poskytovala efektívnu a bezpečnú komunikáciu pre zariadenia Internetu vecí (IoT), vychádzajúc z osvedčených postupov a protokolov zavedených v rámci širšieho ekosystému LTE. Táto sekcia sa zameriava na kľúčové bezpečnostné prvky LTE Cat-M, vrátane autentifikácie zariadení, ochrany identity, šifrovania dát a konfigurácie bezpečnosti[27].

Základom bezpečnosti LTE Cat-M je robustný autentifikačný proces. Autentifikácia zariadenia v tejto technológii je zabezpečená pomocou unikátneho identifikátora IMSI, ktorý je uložený v UICC (univerzálny integrovaný obvody prvok), ako je SIM karta. Autentifikačný postup využíva sériu kryptografických výmen, ktoré zahŕňajú náhodné čísla (RAND) a autentifikačné a šifrovacie kľúče. Tieto kľúče sú derivované pomocou bezpečnostných algoritmov, ako je AES-128, čo je symetrická bloková šifra, ktorá zabezpečuje, že informácie sú bezpečne chránené.

Pre ochranu identity a zabezpečenie súkromia používateľov, LTE Cat-M využíva dočasné identity, známe ako TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity). TMSI je pridelené zariadeniu počas procesu pripájania k sieti a slúži ako anonymizátor, ktorý minimalizuje riziko odhalenia trvalej identity (IMSI) počas komunikácie. Táto metóda výrazne znižuje možnosť sledovania zariadenia a zachytávania citlivých údajov [27].

LTE Cat-M implementuje viacero šifrovacích a integračných algoritmov, ktoré zabezpečujú ochranu prenášaných dát. Medzi základné algoritmy patria SNOW3G a AES pre šifrovanie dát, rovnako ako ZUC, ktorý je alternatívou pre trhy vyžadujúce lokálne šifrovacie štandardy. Pre ochranu integrity dát LTE Cat-M používa algoritmy EIAx, kde 'x' označuje konkrétnu variantu algoritmu. Tieto mechanizmy zabezpečujú, že dáta, či už prenášané alebo uložené, zostávajú nedotknuté a chránené pred neoprávnenými zmenami.

Nastavenie bezpečnostných parametrov je kľúčové pre ochranu komunikácie medzi zariadením a sieťovou infraštruktúrou. LTE Cat-M vykonáva toto nastavenie prostredníctvom série signalizačných správ, ktoré konfigurujú šifrovacie a integračné algoritmy na zariadeniach a v sieti. Tento proces začína vydaním 'Security Mode Command' od Mobility Management Entity (MME), ktoré inštruuje zariadenie, aké bezpečnostné algoritmy používať. Nasleduje fáza overenia, kde zariadenie potvrdzuje, že integrita prijatej správy bola zachovaná, a začína používať vybrané bezpečnostné nastavenia [27].



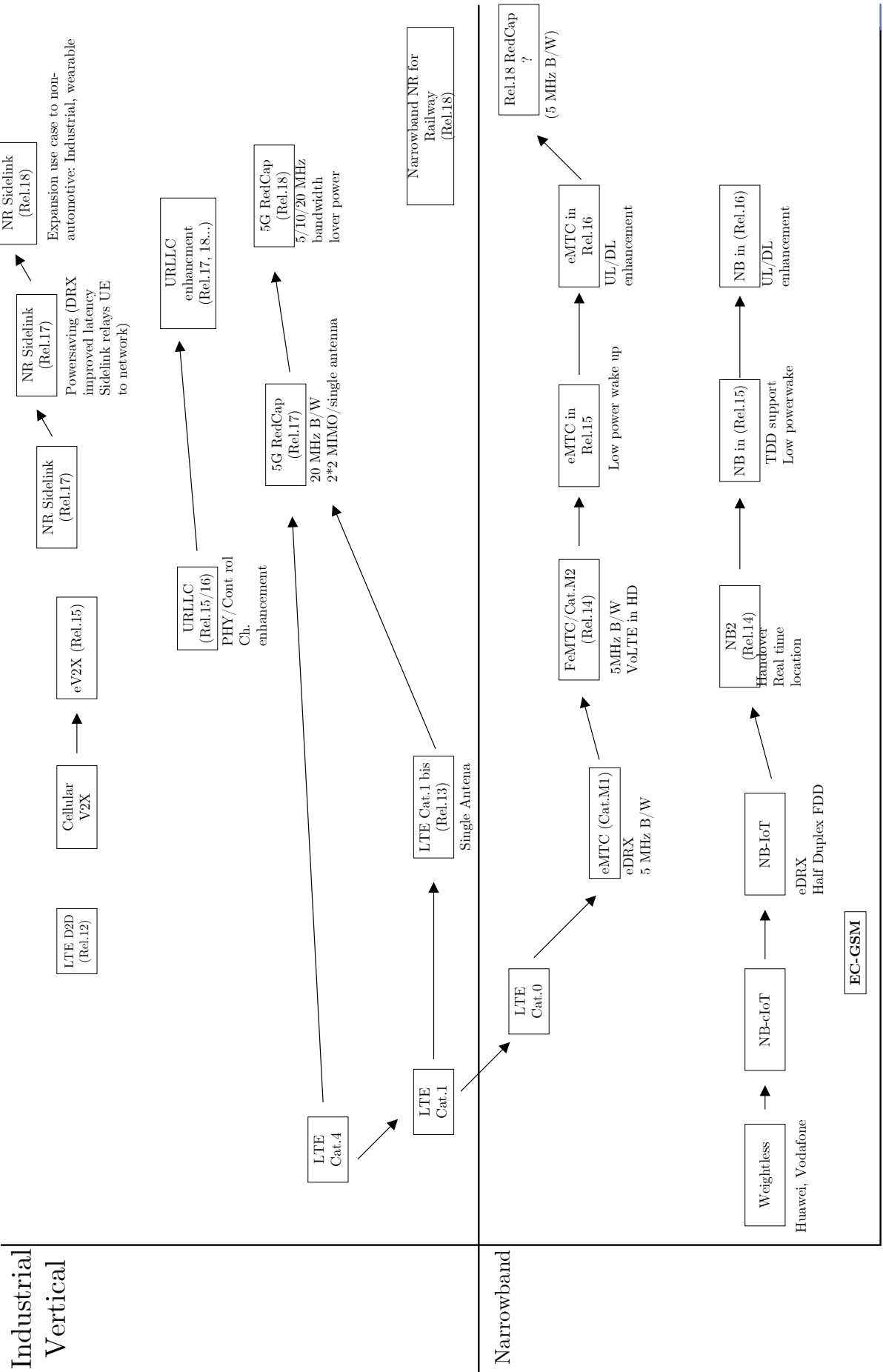
### 3.9 Porovnanie parametrov technológií NB-IoT a LTE-M

Tabuľka nižšie poskytuje prehľad hlavných parametrov technológií NB-IoT a LTE Cat-M. Tabuľka obsahuje kľúčové rozdiely vyššie spomínaných technológií ako rozdielne šírky pásma kanálu, frekvenčné nasadenie, prenosové rýchlosti alebo spotrebu energie či latenciu.

Tab. 3.7: Porovnanie parametrov technológií NB-IoT a LTE Cat-M [4].

	NB-IoT	LTE-M
Štandard	3GPP	3GPP
Spektrum [MHz]	Licencované LTE frekvenčné pásma	Licencované LTE frekvenčné pásma
Dosah [km]	11	10-15
Výkon vysielania [dBm]	23	23
Bilancia spojenia (MCL) [dB]	151	146
Frekvenčné nasadenie	In-band, Guard-band, Stand-alone	In-band
Modulácia	Uplink: GFSK Downlink: BPSK	Uplink: SC-FDMA, 16 QAM Downlink: OFDMA, 16 QAM
Šírka pásma kanálu [kHz]	180	1400 - 2000
Maximálna veľkosť dát [B]	1600	1000
Spotreba energie	stredná (nižšia ako LTE-M)	stredná (vyššia ako NB-IoT)
Latencia [ms]	1 600 - 10 000	10 - 15
Životnosť batérie [rokov]	10	10
Topológia	hviezda	hviezda
Počet antén	1 (SISO)	1 (SISO)
Zabezpečenie	NSA/AES 256	AES 256
Dosah [km]	1 v meste 10 na vidieku	5
Prenosová rýchlosť [kb/s]	Downlink: 127 Uplink: 159	Downlink: 1000 Uplink: 1000
Kapacita bunky	200	1 000 000
Technika prenosu	FDD	FDD/TDD

Obr. 3.4 nižšie zobrazuje prehľadný diagram vývoja štandardov mobilnej komunikácie s dôrazom na prechod od LTE k 5G. Na obrázku sú rôzne kategórie a Vydania LTE, ako sú LTE Cat.1 a LTE Cat.4, ktoré sa postupne vyvíjajú do pokročilejších štandardov, vrátane rôznych vydání 5G enhanced Mobile Broadband (eMBB). Diagram ilustruje tiež špeciálne technológie pre priemyselné a úzke pásmové aplikácie, ako je NB-IoT a technológie špecifické pre železnice. V diagrame sú zdôraznené aj kľúčové vylepšenia, ako sú zvýšené dátové rýchlosti, energetická efektivita, a nízka latencia. Na obrázku je tiež vidieť viacero smerov vývoja s prepojeniami medzi rôznymi technológiami a ich vylepšeniami v rôznych Vydaniach.



Obr. 3.4: Přehled vydání [46].



## 4 Dostupné komunikačné moduly

V dnešnej dobe, keď sa Internet vecí (IoT) stáva čoraz viac prepojeným a rozšíreným, sa úloha komunikačných modulov stáva nevyhnutnou pre rozličné aplikácie a zariadenia. Táto kapitola sa zaoberá prehľadom dostupných komunikačných modulov, ktoré umožňujú zariadeniam komunikovať a prenášať dáta. Predstavené budú kľúčové charakteristiky a funkcie vybraných modulov, ktoré sú zásadné pre výber správneho riešenia pre špecifické potreby IoT aplikácií. Od základných parametrov po pokročilé funkcie je poskytnutý ucelený pohľad na to, ako tieto moduly prispievajú k väčšej konektivite a efektivite IoT ekosystémov.

### 4.1 Modul BG77

Modul BG77 od spoločnosti Quectel predstavuje inovatívne riešenie v oblasti bezdrôtovej komunikácie, ktoré kombinuje vysokú výkonnosť, nízku spotrebu energie a širokú škálu podporovaných frekvenčných pásiem. Tento modul je navrhnutý s ohľadom na náročné požiadavky na spojenie IoT a má potenciál transformovať spôsob, akým zariadenia komunikujú a interagujú s okolitým svetom [47].

V tejto kapitole je podrobné zoznámenie sa s modulom BG77, jeho technickými vlastnosťami a kľúčovými výhodami. Preskúvané budú podporované frekvenčné pásma pre LTE komunikáciu a rôzne typy Global Navigation Satellite System (GNSS) systémov, ktoré tento modul podporuje. Rozobraté budú aj jeho základné parametre.

#### 4.1.1 Všeobecný popis

BG77 je vstavaný IoT (LTE Cat M1, LTE Cat NB2) bezdrôtový komunikačný modul. Zabezpečuje dátovú konektivitu v sieti LTE-FDD a podporuje poloduplexný režim prevádzky v sieti LTE. Modul taktiež ponúka Global Navigation Satellite System (GNSS) a hlasovú funkcionálnosť na splnenie špecifických požiadaviek konkrétnej aplikácie [47].

Modul využíva architektúru, v ktorej sú zdieľané špecifické hardvérové bloky Wireless Wide Area Network (WWAN) a GNSS Rx, avšak modul nepodporuje súbežnú prevádzku WWAN a GNSS. Riešením problému je implementácia hrubého multiplexu s časovým delením (TDM) medzi reťazcami WWAN a GNSS Rx. Výrobca uvádza, že spomínaný modul je určený výhradne pre priemyselné a obchodné aplikácie.

S kompaktnými rozmermi 14,9 mm x 12,9 mm x 1,7 mm môže modul spĺňať takmer všetky požiadavky pre aplikácie M2M, ako sú inteligentné merania, sledovacie

systemy alebo bezdrôtové pokladničné systémy. Je vhodný predovšetkým pre aplikácie, ktoré vyžadujú malé rozmery a nízku hmotnosť, ako sú inteligentne hodinky alebo iné nositeľné zariadenia.

Modul je typu Surface Mount Device (SMD), ktorý je možné vložiť do aplikácií pomocou 94 Land Grid Array (LGA) pinov. Podporuje internetové protokoly služieb ako Transmission Control Protocol (TCP), User Datagram Protocol (UDP), Point-to-Point Protocol (PPP). S využitím rozšírených AT príkazov vyvinutých spoločnosťou Quectel je možné jednoducho používať spomínané protokoly internetových služieb [47].



Obr. 4.1: Modul LPWAN BG77[48].



Obr. 4.2: Devkit modulu LPWAN BG77.

## 4.1.2 Základné parametre

V podkapitole je rozobratý prehľad technických charakteristík pokročilého komunikačného modulu navrhnutého tak, aby poskytoval rozmanité služby od pripojenia cez LTE až po pokročilé možnosti GNSS. Obsiahnuté informácie v tabuľke sú rozdelené do viacerých sekcií, zahrňujúcich parametre ako napájanie, rôzne typy rozhraní, podporované protokoly, čo zaisťuje schopnosť efektívneho pripojenia a komunikácie v rámci rozličných sieťových konfigurácií. Okrem toho sú zdôraznené aj kľúčové aspekty ako odolnosť voči extrémnym teplotám. Tieto atribúty poukazujú na flexibilitu a multifunkčnosť, ktoré sú kritické pre aplikácie v dnešnom rýchlo meniacom sa technologickom prostredí [47].

Tab. 4.1: Základné parametre modulu BG77 [47].

Funkcie	Podrobnosti
Napájanie [V]	Napätie: 2.6 - 4.8 Typické napätie: 3.3
Trieda vysielacieho výkonu	Trieda 5 (21 dBm + 1.7/-3 dB) pre pásma LTE-FDD
Funkcie LTE	Podpora 3GPP Vydanie 14 Podpora LTE Cat M1 a LTE Cat NB2 Podpora 1.4 MHz RF šírky pásma pre LTE Cat M1 Podpora 200 kHz RF šírky pásma pre LTE Cat NB2 Cat M1: max. 588 kb/s (downlink) / max. 1119 kb/s (uplink) Cat NB2: max. 127 kb/s (downlink) / max. 158.5 kb/s (uplink)
Internetové protokoly	Podpora PPP/TCP/UDP/SSL/TLS/FTP(S)/HTTP(S)/NITZ/PING/MQTT/LwM2M/CoAP/IPv6 protokoly
SMS	Textový PDU režim Point-to-point MO a MT Vysielanie SMS správ
(U)SIM rozhranie [V]	Podpora iba 1.8 USIM/SIM kariet
PCM rozhranie	Podpora jedného digitálneho audio rozhrania: PCM iba pre VoLTE
USB rozhranie	Súlad s USB 2.0 špecifikáciou (iba slave) Podpora operácií pri vysokých a nízkych rýchlostiach Využitie na komunikáciu AT príkazov, prenos dát, výstup GNSS, softvérové ladenia a aktualizáciu firmvéru
UART rozhrania	Hlavné: Používa sa pre prenos dát a komunikáciu AT príkazov Predvolená baud rate rýchlosť 115200 b/s Predvolený formát rámu je 8N1(8 dátových bitov, bez parity, 1 stop bit) Podpora RTS a CTS hardverovej kontroly toku  Debug UART: Používa sa na softvérové ladenie a výstup logov Podpora prenosovej rýchlosti 115200 b/s  GNSS UART: Používa sa na výstup GNSS NMEA viet Podpora prenosovej rýchlosti 115200 b/s
GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo a QZSS Štandardná rýchlosť aktualizácie dát 1 Hz
AT príkazy	Podľa 3GPP TS 27.007 a 3GPP TS 27.005 Rozšírené AT príkazy Quectel
Indikácia siete	Využitie jedného NET_STATUS pinu
Anténne rozhrania	Hlavné anténové rozhranie (ANT_MAIN) GNSS anténové rozhranie (ANT_GNSS)
Rozsah teplôt [°C]	Prevádzkový teplotný rozsah: -35 do + 75 Rozšírený teplotný rozsah : -40 do + 85 Rozsah teplôt pri skladovaní: -40 do + 90

### 4.1.3 Frekvenčné pásma

V tejto podkapitole sú preskúvané dve kategórie zariadení, Cat M1 a Cat NB2, s ohľadom na ich kompatibilitu s rôznymi pásmami LTE-FDD. Zariadenia kategórie Cat M1 sú kompatibilné s pomerne širokou škálou pásiem, ktoré môžete vidieť nižšie v Tab. 4.2. Druhá kategória Cat NB2 podporuje takmer identické pásma s pridaním pásma B71, čím rozširuje možnosti konektivity ešte viac, a to aj v oblastiach, kde je spomínané pásmo preferované alebo výhradne využívané. Pre obe kategórie zariadení je priradená trieda výkonu [47].

Tab. 4.2: Frekvenčné pásma Cat M1 a Cat NB2 modulu BG77 [47].

Kategória zariadenia	Podporované pásma LTE-FDD	Trieda výkonu
Cat M1	B1/B2/B3/B4/B5/B8/B12/B13/B18/B19/B20/B25/B26/B27/B28/B66/B85	5 (21 dBm)
Cat NB2	B1/B2/B3/B4/B5/B8/B12/B13/B18/B19/B20/B25/B28/B66/B71/B85	5 (21 dBm)

### 4.1.4 Šetriace režimy

#### Režim úspory energie

Modul minimalizuje svoju spotrebu energie vstupom do PSM. Režim je podobný vypnutému stavu, ale napriek tomu zostáva zaregistrovaný v sieti a nie je potrebné znovu sa pripájať alebo obnovovať PDN spojenia. Kvôli tomu nemôže modul v PSM ihneď reagovať na požiadavky používateľov [47].

V prípade, že chce modul použiť PSM, musí pri každom procese pripojenia a aktualizácií polohy žiadať o hodnotu aktívneho času. Ak sieť podporuje PSM a akceptuje, že modul používa PSM, sieť potvrdí použitie PSM pridelením hodnoty aktívneho času modulu. Pri zmene hodnoty aktívneho času modul žiada požadovanú hodnotu v procese TAU.

#### Rozšírený pohotovostný mód s DRX

Modul a sieť komunikujú pomocou signálov neprístupovej vrstvy o použití e-I-DRX na zníženie spotreby energie. Tento proces zabezpečuje, že modul je stále schopný spracovávať dáta prichádzajúce z mobilného ukončenia spojenia alebo sieťové procedúry, pričom časové oneskorenie je závislé od nastavenia hodnoty cyklu DRX.

Na vyjednávanie o použití e-I-DRX, UE požiada o parametre počas procesu pripojenia a aktualizácie polohy. EPC môže požiadavky UE na povolenie e-I-DRX prijať alebo zamietnuť. V prípade prijatia môže na základe dostupných parametrov ponúknuť požadované parametre. V opačnom prípade zamietnutia nie sú parametre obdržané [47].



## 4.2 Modul BC660K-GL

V súčasnom technologicky progresívnom období je modul BC660K-GL od spoločnosti Quectel vzorom inovácie a efektivity v oblasti komunikačných modulov. Tento modul je založený na technológii NB-IoT (Narrowband IoT), ktorá je špeciálne navrhnutá pre IoT zariadenia s nízkou spotrebou energie a schopnosťou pracovať v širokopásmovom prostredí. Táto podkapitola je venovaná podrobnému preskúmaniu modulu BC660K-GL, jeho technickým charakteristikám a schopnostiam, ktoré ho odlišujú od ostatných v rastúcom poli internetu vecí (IoT).

### 4.2.1 Všeobecný popis

BC660K-GL je vysoko výkonný NB-IoT s výrazne nízkou spotrebou energie. Je navrhnutý na komunikáciu, ktorá využíva infraštruktúry mobilných operátorov prostredníctvom rádiových protokolov NB-IoT 3GPP Vydanie 13 a 14. Podporuje široký rozsah frekvenčných pásiem, uvedených nižšie [49].

BC660K-GL je typu SMD s kompaktnými rozmermi 17,7 mm x 15,8 mm x 2,0 mm umožňujúce jednoduchú prácu s aplikáciami s obmedzenými rozmermi. Disponuje externými rozhraniami ako Universal Asynchronous Receiver & Transmitter (UART), Analog-to-Digital Converter (ADC), USIM a taktiež protokolovými zásobníkmi ako UDP, TCP, Message Queuing Telemetry Transport (MQTT).

Kompaktné rozmery, ultra-nízka spotreba energie a rozšírený teplotný rozsah z neho robia jednu z najlepších volieb pre širokú škálu aplikácií IoT, ako sú inteligentné merania alebo inteligentné domácnosti. Uplatnenie nachádzajú pri inteligentnom parkovaní, bezpečnosti a sledovaní majetku či poľnohospodárskom a environmentálnom monitorovaní. Poskytuje kompletný rad služieb SMS a prenosu dát [49].

### 4.2.2 Základné parametre

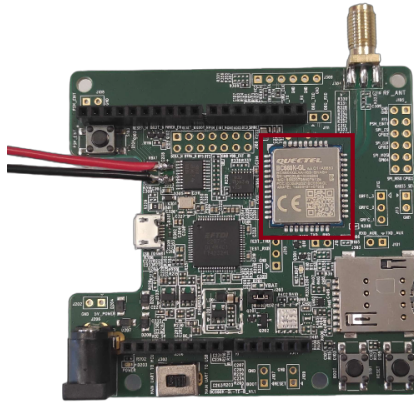
V podkapitole je rozobratý prehľad technických charakteristík komunikačného modulu. Obsiahnuté informácie v tabuľke sú rozdelené do viacerých sekcií, zahrňujúcich parametre ako napájanie, rôzne typy rozhraní, podporované protokoly, čo zaisťuje schopnosť efektívneho pripojenia a komunikácie v rámci rozličných sieťových konfigurácií. Okrem toho sú zdôraznené aj kľúčové aspekty ako odolnosť voči extrémnym teplotám [49].



Obr. 4.3: Modul LPWA BC660K[49].

Tab. 4.3: Základné parametre modulu BC660K-GL [49].

Funkcie	Podrobnosti
Napájanie [V]	Napätie : 2.2 - 4.3 Typické napätie: 3.3
Vysielací výkon [dBm]	23
Spotreba energie [mA]	800
Prenos dát [kb/s]	Jednotónový: 25.5 (downlink) / 16.7 (uplink) Viacotónový: 127 (downlink) / 158.5 (uplink)
Internetové protokoly	Podpora UDP/TCP/SNTP/LwM2M/ MQTT/TLS/DTLS/SSL/SMS
SMS	Textový režim PDU režim
(U)SIM rozhranie [V]	Podpora USIM 1.8/3.0
UART rozhrania	Hlavný UART: Používaný pre komunikáciu AT príkazov a prenos dát, kde prednastavená prenosová rýchlosť je 115200 b/s Používaný pre aktualizáciu firmvéru, kde je prednastavená prenosová rýchlosť 921600 b/s  Debug UART: Používaný na ladenie Prednastavená prenosová rýchlosť 6 Mb/s
AT príkazy	Podľa 3GPP 27.005 a 3GPP 27.007 (3GPP Vydanie 13) Rozšírené AT príkazy Quectel
Aktualizácia firmvéru	Cez hlavný UART port Cez DFOTA
Anténa impedancia	50 $\Omega$
Rozsah teplôt [°C]	Prevádzkový teplotný rozsah: -35 do + 75 Rozšírený teplotný rozsah: -40 do + 85 Rozsah teplôt pri skladovaní: -40 do + 90



Obr. 4.4: Devkit modulu LPWA BC660K.

### 4.2.3 Frekvenčné pásma

Táto podkapitola je zameraná na popis frekvenčného módu Half Duplex Frequency Division Duplexing (H-FDD), ktorý je podporovaný najnovším modulom telekomunikačnej technológie. Modul ponúka široký rozsah podporovaných frekvenčných pásiem uvedených v Tab. 5.3. Táto podpora zaisťuje vysokú mieru kompatibility s globálnymi LTE sieťami a otvára dvere pre použitie v rôznych aplikáciách, od IoT zariadení až po komplexné komunikačné systémy [49]

Tab. 4.4: Frekvenčné pásma modulu BC660K [49].

Mód	Podporované frekvenčné pásma
H-FDD	B1/B2/B3/B4/B5/B8/B12/B13/B18/B19/B20/B25/B28/B66/B70/B85

### 4.2.4 Šetriace režimy

#### Lahký spánok

V režime ľahkého spánku nefunguje sériový port UART a modul je možné prebudiť na hrane PSM\_EINT alebo odoslaním príkazu AT cez hlavný port UART.

#### Hlboký spánok

Modul v režime hlbokého spánku spotrebuje extrémne nízky prúd (800 nA). Hlavným účelom hlbokého spánku je znížiť spotrebu energie modulu a predĺžiť trvanie napájania batérie. Sériový port v tomto režime nefunguje.

Pri vstupe do PSM módu modem žiada o povolenie správou ATTACH REQUEST alebo TAU REQUEST. Následne sieť akceptuje požiadavku a poskytuje modemu hodnotu aktívneho časovača (T3324). Po uplynutí časovača modem vstúpi do PSM. Prebudenie modulu z režimu hlbokého spánku je možné automaticky po vypršaní časovača alebo odoslaním AT príkazu [49].

## 4.3 Modul SIM7022

Modul SIM7022 je kompaktný a energeticky účinný modul NB-IoT, ktorý sa stáva čoraz populárnejším v oblasti IoT vďaka svojej schopnosti poskytovať spoľahlivú konektivitu v oblastiach s obmedzeným prístupom k sieti. Tento modul je navrhnutý pre aplikácie vyžadujúce nízku spotrebu energie a dlhú životnosť batérie, čo je ideálne pre zariadenia IoT, ako sú senzory, inteligentné mestá, inteligentné poľnohospodárstvo a ďalšie.

SIM7022 podporuje rôzne sieťové protokoly a má integrované funkcie, ako je TCP/IP, čo umožňuje jednoduchú integráciu do rôznych IoT aplikácií. Jeho malá veľkosť a flexibilita v konfigurácii z neho robia ideálnu voľbu pre vývojárov a výrobcov, ktorí chcú rýchlo a efektívne nasadiť IoT riešenia [50].

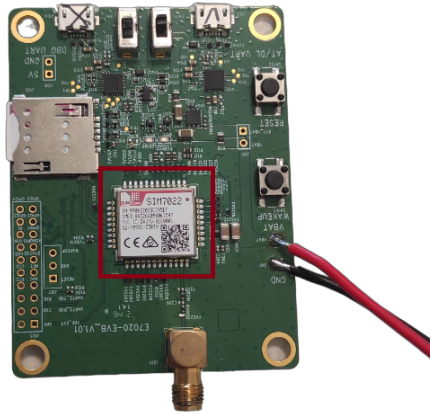
### 4.3.1 Všeobecný popis

Modul SIM7022 disponuje silnou rozširiteľnosťou s veľkým výberom rozhraní, vrátane UART, GPIO a iných. Modul poskytuje veľkú flexibilitu a ľahkú integráciu pre aplikácie. Vďaka unikátnej kombinácii výkonu, bezpečnosti a flexibility je tento modul ideálne vhodný pre aplikácie M2M, ako je meranie, sledovanie majetku alebo diaľkové monitorovanie zdravia [50].

Podporuje LTE kategóriu NB2, 2-HARQ. Fyzické rozmery modulu sú 17,6 mm x 15,7 mm x 2,3 mm. Je navrhnutý pre aplikácie, ktoré vyžadujú nízku latenciu a nízky prietok dát v rozličných rádiových podmienkach [50].



Obr. 4.5: Modul SIM7022[50].



Obr. 4.6: Devkit modulu SIM7022.

### 4.3.2 Základné parametre

Podkapitola o základných parametroch modulu SIM7022 odhaľuje zásadné vlastnosti, ktoré definujú jeho operatívnu výkonnosť a využitie v aplikáciách IoT. Modul je navrhnutý tak, aby bol energeticky efektívny a kompatibilný s rôznymi napájacími systémami, čo je zdôraznené jeho schopnosťou pracovať v širokom rozsahu napätí [50]. Táto flexibilita robí SIM7022 vhodným pre zariadenia, ktoré musia pracovať v rozličných energetických podmienkach, a to aj v tých najviac energeticky obmedzených.

Tab. 4.5: Základné parametre modulu SIM7022 [50].

Funkcie	Podrobnosti
Napájanie [V]	Napätie : 2.2 - 4.3 Typické napätie: 3.3
Vysielací výkon	Trieda výkonu LTE: 3 (23 dBm)
Prenos dát [kb/s]	LTE Cat NB2 : 127 (downlink) LTE Cat NB2 : 159 (uplink)
SIM rozhranie [V]	Podpora identifikačnej SIM 1.8/3.0
UART rozhrania	UART1: Štandardne plnohodnotný modemový sériový port Využívaný pre AT príkazy Využívaný pre upgrade firmvéru a RF kalibráciu Baud rate : 115200 b/s  UART0: Softvérové ladenie a výstup logu ladenia Baud rate : 3 Mb/s
Anténa	Hlavná LTE anténa
Rozsah teplôt [°C]	Prevádzkový teplotný rozsah: -40 do + 80 Rozsah teplôt pri skladovaní: -45 do + 90

### 4.3.3 Frekvenčné pásma

Modul SIM7022 je určený pre IoT aplikácie a patrí do kategórie Cat NB2, čo znamená, že je optimalizovaný pre úzko-pásmovú komunikáciu v sieti LTE. Podpora širokej škály frekvenčných pásiem umožňuje tomuto modulu pracovať v mnohých krajinách a s rôznymi operátormi, čo z neho robí flexibilnú voľbu pre celosvetové nasadenie.

Podpora týchto frekvencií je výhodná pre zariadenia, ktoré musia fungovať v rôznych prostrediach, od mestských až po odľahlé oblasti. Z tohto dôvodu je SIM7022 vhodný pre aplikácie, ktoré si vyžadujú dlhodobú konektivitu a nízku spotrebu energie, ako sú monitorovacie zariadenia pre životné prostredie [50].

Tab. 4.6: Frekvenčné pásma modulu SIM7022 [50].

Kategória zariadenia	Podporované frekvenčné pásma LTE-HD-FDD
Cat NB2	B1/B2/B3/B4/B5/B8/B12/B13/B17/B18/B19/B20/B25/B26/B28/B66/B70/B85

### 4.3.4 Šetriace režimy

#### Režim úspory energie

Funkcia PSM modulu môže byť aktivovaná pomocou AT príkazov. V prípade splnenia podmienok, modul sa automaticky prepne do PSM, v ktorom má nízky prúd (800 nA). Cieľom je znížiť spotrebu energie modulu a predĺžiť dobu životnosti batérie.

PSM sa spustí po ukončení dátovej konektivity alebo aktualizácii TAU. Keď sa modul pripojí k sieti alebo aktualizuje TAU, sieť pošle modulu časovače T3324 a T3412, potom modul vstúpi do režimu IDLE. V tomto režime bude modul prenášať dáta so sieťou (stav DRX). Keď časovač T3324 vyprší, modul vstúpi do PSM.

V PSM je modul v režime úspory energie, ukončí spojenie so sieťou, vypne väčšinu zdrojov napájania a zachová sa iba funkcia RTC, modul nemôže byť prebudený. Keď časovač T3412 vyprší, modul sa prebudí. Prebudenie z PSM je riešené pomocou AT príkazov alebo vypršaním časovača T3412 [50].





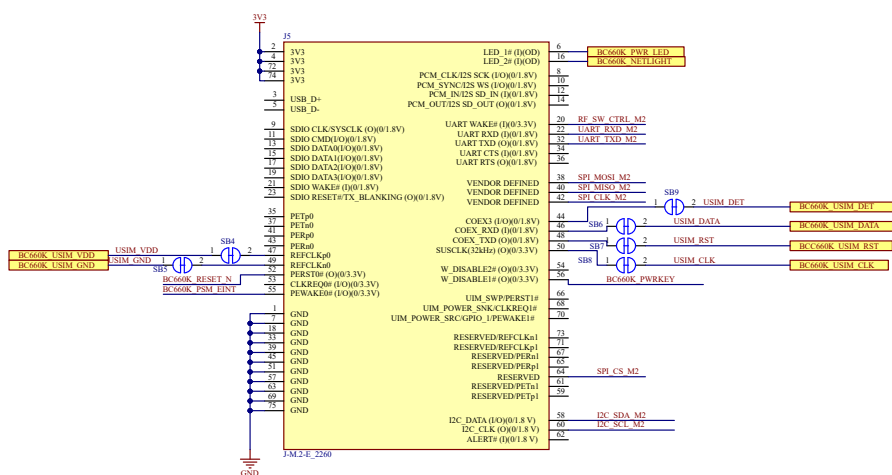
## 5 Návrh schémy a DPS modulu BC660K-GL

Nasledujúca kapitola sa venuje návrhu schémy a dosky plošných spojov (DPS) pre komunikačný modul BC660K-GL od výrobcu Quectel, bližšie rozobratého v podkapitole 4.2. Návrh schémy spolu s DPS bol vytvorený v programe Altium Designer. Kompletná schéma návrhu modulu BC660K-GL je vyobrazená v prílohe A. Zoznam všetkých použitých komponentov v súlade s výslednou verziou schémy je vyobrazené v prílohe D vo forme prehľadovej tabuľky.

### 5.1 Zapojenie MCU

Zapojenie obvodu MCU M.2 pozostáva z komunikačných rozhraní, ako sú UART, I2C, SDIO a USB. Obvod je zobrazený na obrázku 5.1 a je napájaný napätím 3,3 V. Pre komunikáciu sú určené piny UART rozhrania, konkrétne UART TXD pre vysielanie a UART RXD pre prijímanie. MCU poskytuje piny pre komunikáciu s MicroSD kartou.

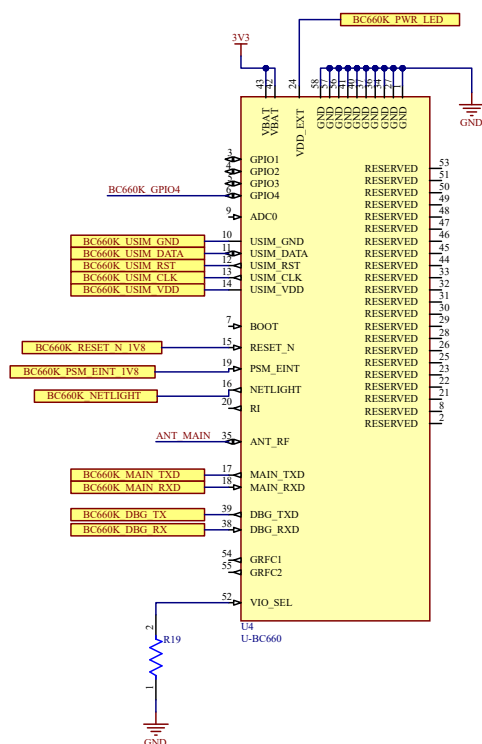
Schéma MCU M.2 pre BC660K ilustruje komplexnú integráciu rozličných komunikačných rozhraní a radiacích funkcií, ktoré sú nevyhnutné pre efektívne fungovanie modulu v rámci širšieho systému. Táto schéma poskytuje podrobný náhľad na to, ako sú jednotlivé komponenty zapojené [51].



Obr. 5.1: Schéma MCU.

## 5.2 Zapojenie BC660K-GL

Obvod je zobrazený na obrázku 5.2 a je napájaný napätím 3,3 V. Napájacie napätie je privedené na VBAT výstupy. Výstup VDD EXT slúži na pripojenie obvodu signalizujúceho zapnutie modulu (PWR LED), čo je bližšie rozobrané v podkapitole 5.5.3. Základom pre sériové rozhranie (UART) sú piny MAIN TXD a MAIN RXD, ktoré umožňujú modulu komunikovať napr. s externými mikrokontrolérmi. Debugovacie rozhranie (DBG TX a DBG RX) umožňuje prenos diagnostických informácií a príkazov medzi modulom a mikrokontrolérom. Tento komunikačný kanál je kľúčový pre efektívne vyhľadávanie a odstraňovanie problémov, ako aj pre overovanie funkčnosti modulu počas vývojových a testovacích fáz. Pre autentifikáciu modulu v mobilnej sieti sú na modul privedené rozhrania USIM GND, USIM DATA, USIM RST, USIM CLK, USIM VDD, bližšie rozobraté v podkapitole 5.4. Spojenie modulu s anténami je zabezpečené pomocou vývodu ANT MAIN. Pre možnosť programového resetovania modulu je využitý vývod RESET N. Funkciu prebudenia modulu z energeticky úsporného režimu zastupuje PSM EINT a vizuálnu indikáciu sieťového stavu NETLIGHT. Vývod VIO SEL umožňuje nastavenie napätia buď na 3,3 V/1,8 V. Modul ponúka štyri GPIO piny pre možnú interakciu s rôznymi senzormi alebo spínačmi [51].

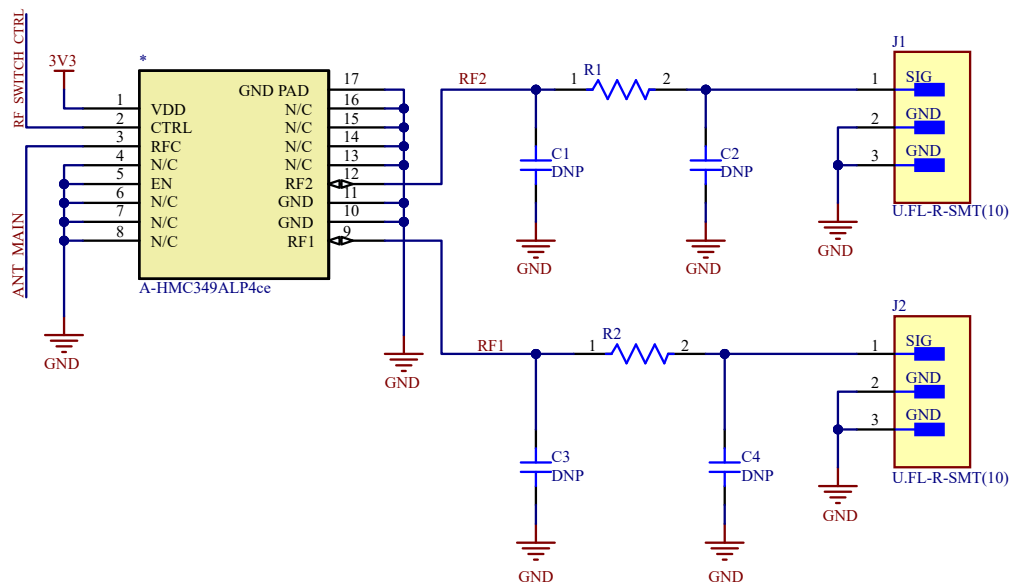


Obr. 5.2: Zapojenie BC660K-GL.

## 5.3 Zapojenie anténnej časti

Zapojenie anténnej časti obvodu je zobrazené na obrázku 5.3. Anténa časť obsahuje malé koaxiálne konektory (J1, J2), ktoré umožňujú pripojenie anténnych vedení k modulu, čím zabezpečujú spoľahlivé rozhranie s minimálnymi stratami signálu. Signalizačné piny (SIG) prenášajú rádiový signál medzi modulom a anténou. Trasa antény vyžaduje impedanciu s hodnotou  $50 \Omega$ .

RF prepínač A-HMC349ALP4ce umožňuje prepínanie medzi dvoma anténnymi cestami (RF1, RF2) podľa potrieb používateľa. Prepínač je riadený napájacím pinom VDD, prepínacím pinom CTRL, výstupným pinom RFC a aktivačným pinom EN. Kondenzátory C1, C2, C3, C4 sú označené ako Do Not Populate (DNP), čo znamená, že nebudú osadené na DPS [51, 52].



Obr. 5.3: Zapojenie anténnej časti[52].

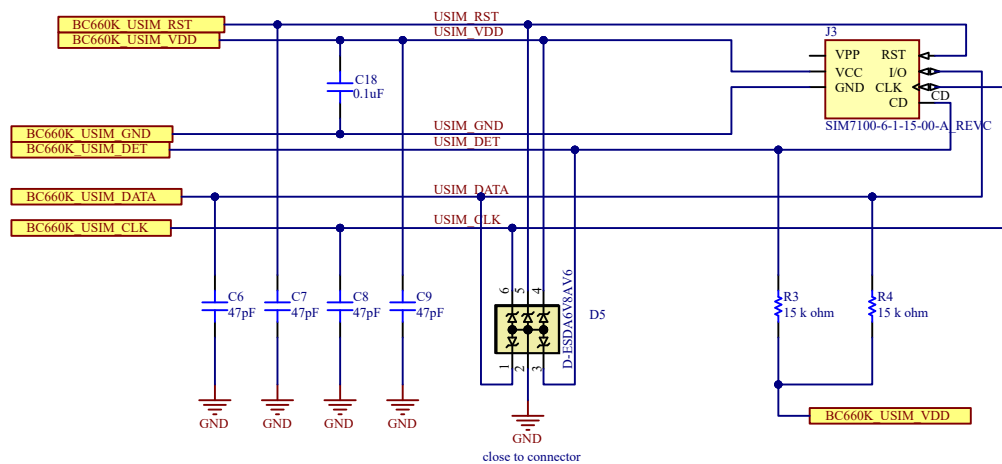
## 5.4 Zapojenie MicroSD

Obvod pre MicroSD je zobrazený na obrázku 5.4. Dvojica pinov USIM VDD a USIM GND poskytuje stabilné napájanie a uzemnenie pre spoľahlivé čítanie a zápis dát na SIM kartu. Prenos dát medzi modulom a SIM kartou zabezpečuje dátový pin USIM DATA, ktorý je zodpovedný za prenos príkazov a odpovedí medzi modulom a čipom SIM karty. Synchronizačný hodinový signál pre operácie čítania a zápisu má na starosti tzv. hodinový pin USIM CLK. Na resetovanie SIM karty a jej inicializáciu pri zapnutí alebo výpadku sa používa resetovací pin USIM RST. Detekčný pin USIM

DET slúži na detekciu prítomnosti SIM karty a signalizuje systému, že SIM karta je správne vložená a pripravená na použitie [51, 52].

Kondenzátory C6, C7, C8, C9 a C18 sa používajú na filtráciu a stabilizáciu napájania pre piny SIM karty, čím znižujú rušenie a zabezpečujú čistý signál.

Dioda (D-ESDA6V8AV6) je určená na ochranu citlivých komponentov pred elektrostatickým vybíjaním (ESD). Ochrana ESD je kritická pre SIM rozhrania, pretože manipulácia so SIM kartou môže ľahko indukovať statickú elektrinu, ktorá by mohla poškodiť elektroniku. Dioda D5 pomáha absorbovať a odvádzať nežiaduce napätie a prúdy spôsobené elektrostatickými výbojmi, čím chráni ostatné komponenty v okruhu, najmä čipy a signálové piny [51].



Obr. 5.4: Zapojenie MicroSD[51, 52].

## 5.5 Zapojenie signalizačnej časti

Zapojenie signalizácie pre modul BC660K je navrhnuté tak, aby poskytovalo jednoduché a efektívne riešenie pre vizuálnu spätnú väzbu prostredníctvom LED indikátorov a umožňovalo riadené resetovanie systému. Zobrazený je na obrázku 5.5. Tieto obvody sú kľúčové pre presné informovanie užívateľa o stave zariadenia a jeho kontrole. Použitie tranzistorov na spínanie LED a resetovanie zariadenia umožňuje MCU vykonávať tieto úlohy bez nadmerného zaťaženia, zabezpečujúc tak dlhodobú spoľahlivosť a efektívnosť systému [51].

### 5.5.1 BC660K RESET N

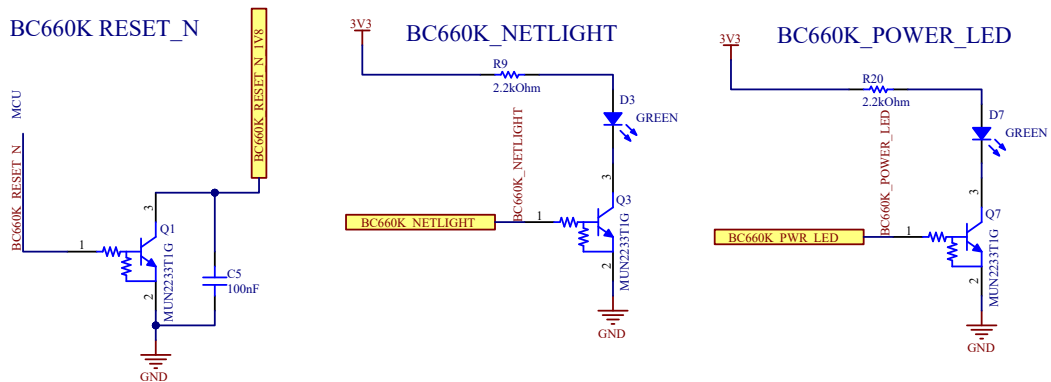
Tranzistor Q1 (MUN2233T1G) je súčasťou resetovacieho obvodu, ktorý umožňuje MCU vyvolať reset modulu. Je to kľúčové pre obnovu systému po chybe alebo pri aktualizácii firmware.

### 5.5.2 BC660K NETLIGHT

Obvod indikuje sieťové pripojenie alebo aktivitu, pričom zelená LED svieti alebo bliká v závislosti od sieťového stavu, čím poskytuje užívateľovi vizuálnu spätnú väzbu. Rezistor R9 obmedzuje prúd prechádzajúci cez LED, aby sa predišlo jej poškodeniu. Tranzistor Q3 (MUN2233T1G) sa používa na spínanie LED na základe signálu z MCU. Tento tranzistor umožňuje MCU kontrolovať LED bez potreby zvládať vysoký prúd napriamo.

### 5.5.3 BC660K PWR LED

Tento obvod slúži na indikáciu napájania zariadenia. Ak je zariadenie zapnuté, LED svieti, poskytujúc jasnú indikáciu, že zariadenie je pod napätím. Podobne ako pri NETLIGHT, aj tu tranzistor umožňuje efektívne riadenie stavu LED prostredníctvom signálu z MCU.

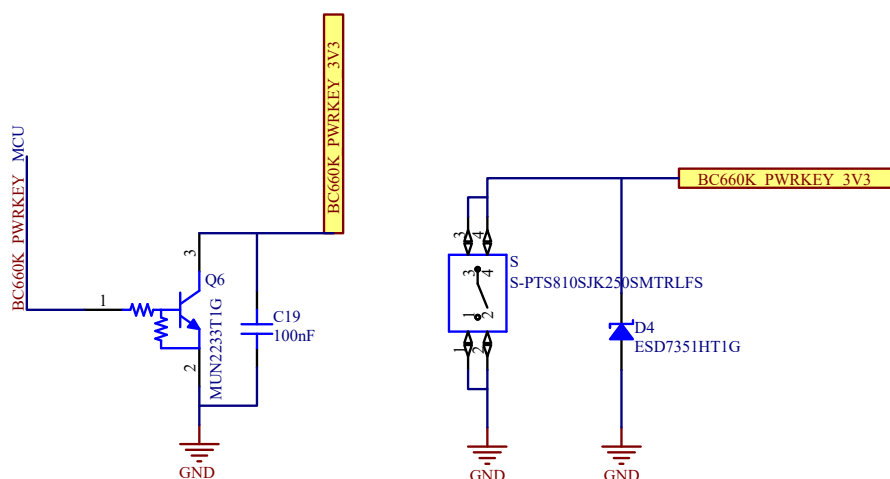


Obr. 5.5: Zapojenie signalizácie[51].

## 5.6 Zapojenie PWRKEY + PWRKEY Button

Schéma Power Key umožňuje užívateľom ovládať zapnutie a vypnutie zariadenia prostredníctvom mechanického tlačidla zobrazená na obrázku 5.6.

Tlačidlo (S-PTS810SJK250SMTRLFS) je integrované s debouncing a ESD ochranou na zabezpečenie spoľahlivosti a dlhodobej životnosti. Tranzistor Q6 (MUN2233T1G) slúži ako spínač, ktorý reaguje na stlačenie tlačidla a povoľuje prúd do napájacieho obvodu zariadenia. Toto zapojenie je dôležité pre interakciu s užívateľom a zabezpečuje základné funkcie riadenia napájania zariadenia [51].



Obr. 5.6: Zapojenie PWRKEY + PWRKEY Button[52].

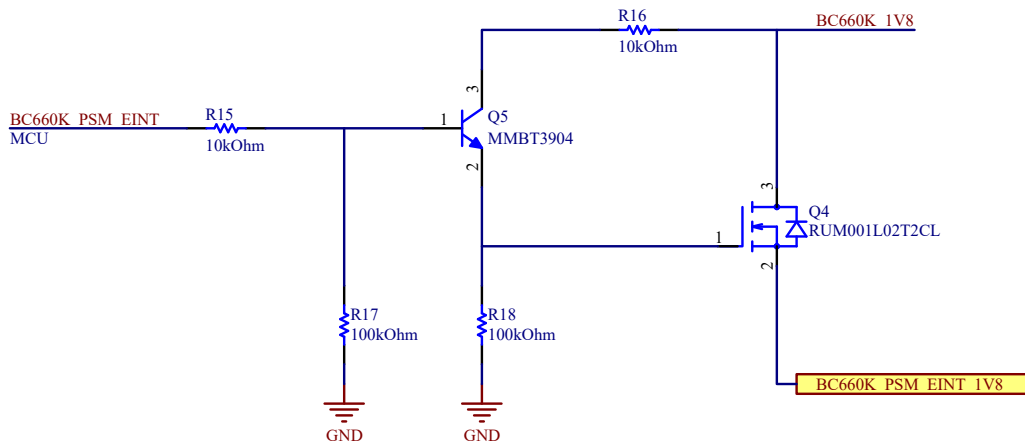
### 5.6.1 Zapojenie Wake Up časti

Schéma "wake up" je nevyhnutná pre správu energeticky efektívneho režimu MCU, umožňujúc zariadeniu zostať v režime nízkej spotreby a rýchlo reagovať na potrebu aktivity, zobrazená na obrázku 5.7.

NPN tranzistor Q5 (MMBT3904) slúži ako spínač, ktorý aktivuje obvod pri prijatí signálu z externej udalosti alebo interného časovača. Jeho úlohou je poskytnúť spoľahlivé zapnutie v reakcii na nízku úroveň signálu z MCU. MOSFET tranzistor Q4 (RUM001L02T2CL) funguje ako ďalší spínací prvok, ktorý pomáha regulovať prúd do MCU na základe stavu Q5 a poskytuje efektívnejší kontrolný mechanizmus pre aktivačný signál [51].

Keď obvod prijme signál (napríklad z externých senzorov alebo iných častí systému), Q5 a Q4 pracujú spolu na prenose tohto signálu do MCU. Aktivácia týchto tranzistorov spôsobí, že MCU prejde z nízkoenergetického stavu do aktívneho režimu, pripraveného na vykonávanie programových úloh. Obvod taktiež zaisťuje,

že MCU zostáva vo vysokej úspornosti energie počas neaktívnych období, čo znižuje celkovú spotrebu energie zariadenia.



Obr. 5.7: Zapojenie Wake Up časti[52].

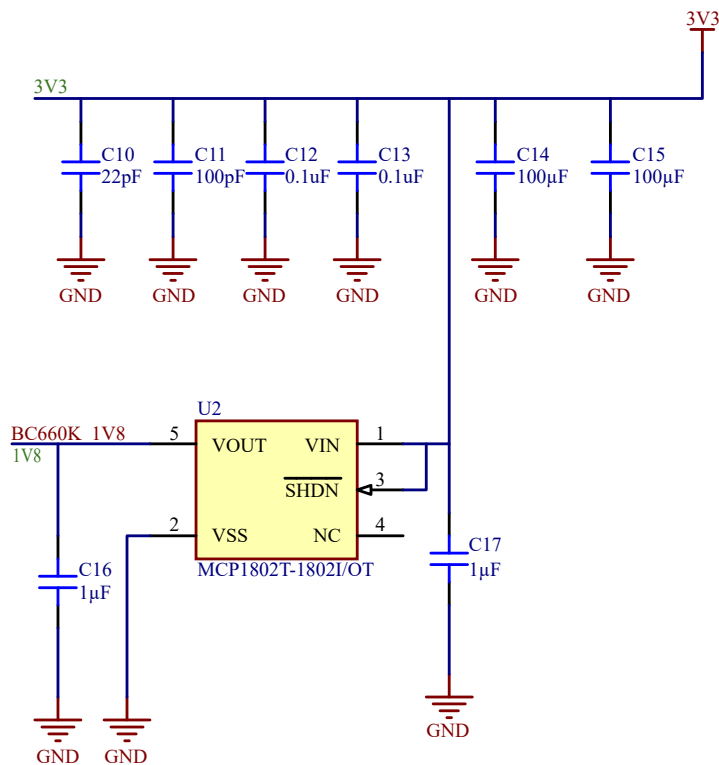
## 5.6.2 Zapojenie napájania

Schéma napájania pre modul BC660K je navrhnutá tak, aby poskytovala stabilné a bezpečné napájanie pre všetky súčasti modulu. Použitie kvalitného napájacieho regulátora spolu s efektívnym MOSFETom a rôznymi pasívnymi komponentami zabezpečuje, že celý systém pracuje spoľahlivo a efektívne.

Tento napájací obvod je základným stavebným kameňom pre správne fungovanie modulu, keďže poskytuje nevyhnutnú energetickú infraštruktúru pre jeho operácie zobrazená na obrázku 5.8 [51, 52].

Nízkonapäťový lineárny napájací regulátor U2 (MCP1802T-1802I/OT) umožňuje prevod 3,3 V zo vstupu na 1,8 V na výstupe. Pin 3 (SHDN) slúži na vypnutie regulátora, čo umožňuje energetickú úspornosť pri neaktivite. Funkciou MOSFET tranzistora Q2 (AO3400A) je spínanie napájania poprípade časť ochranného obvodu. Jeho úlohou je kontrolovať prúdové záťaže a zabezpečiť, aby prúd neprekročil bezpečnostné hranice.

Kondenzátory C10, C11, C12, C13, C16 a C17 slúžia na filtráciu a stabilizáciu napájania tým, že odstraňujú šum a zabraňujú náhlym zmenám napätia, ktoré by mohli poškodiť elektronické komponenty. Kondenzátory s veľkou kapacitou (C14, C15) sú zvlášť dôležité pre udržanie stabilného napätia pri veľkých prúdových záťažiach.



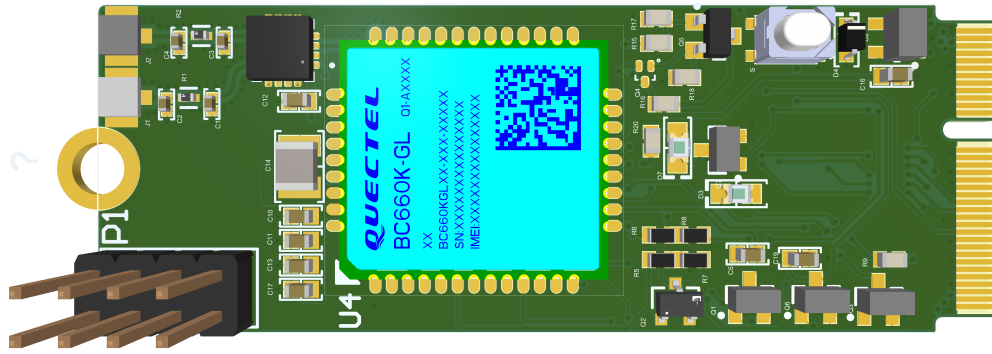
Obr. 5.8: Zapojenie napájania[52].

## 5.7 Návrh dosky plošných spojov

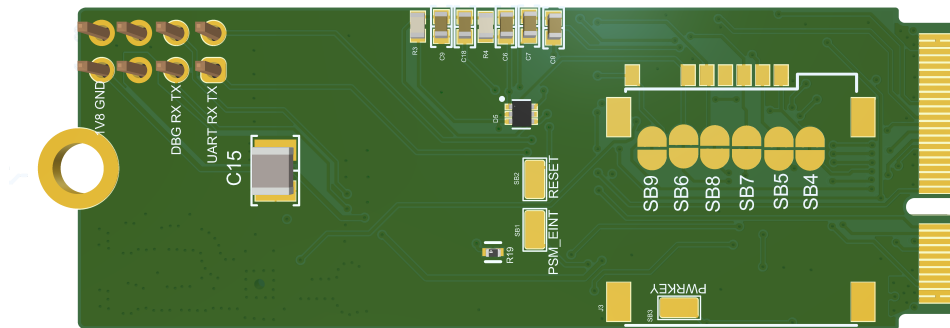
Pre návrh DPS bol využitý program Altium Designer. Vizualizácia 3D návrhu štvorvrstvovej DPS o rozmeroch 22 x 60 x 1,6 mm s popisom použitých komponentov je zobrazená na obrázkoch 5.9 a 5.10. V návrhu boli použité polygóny medi pre obidve strany dosky na zabezpečenie zemnenia, spojené pomocou prekovov skrz celú plochu dosky. Vizualizácia medenných vrstiev vrchnej a spodnej časti DPS sú vyobrazené v prílohe B.

Pri návrhu boli zvolené rozmery pájacích plôch SMD súčiastok tak, aby boli vhodné na ručné osadzovanie. Implementované boli prekovy v blízkosti dimenzovanej trasy k SMD anténe z dôvodu odtienenia trasy.





Obr. 5.9: 3D model návrhu prednej strany DPS.



Obr. 5.10: 3D model návrhu zadnej strany DPS.



Obr. 5.11: Osadenie DPS.

### 5.7.1 Overenie funkčnosti zariadenia

Overenie funkčnosti zariadenia bolo realizované pomocou AT príkazov. Navrhnutý modul BC660K-GL bol vložený do slotu pre externý AddOn M.2 vývojovej dosky IoT založenej na mikroprocesore RP2040. Pre pripojenie sa do Vodafone siete bola využitá SIM karta spomínaného poskytovateľa. Pre komunikáciu s navrhnutým modulom pomocou AT príkazov bola nutná inštalácia softvéru Thonny IDE. Thonny IDE je softvér pre vývoj v pythonu/micropythone. Na komunikáciu s navrhnutým modulom BC660K-GL na vývojovom testeri bol využitý program získaný z predmetu MPC-IOT, ktorý bol prispôbený špecifickým požiadavkám tohto modulu.

```
1 AT
2 OK
3
4 AT+CEREG=4
5 OK
6
7 AT+CFUN=1
8 OK
9
10 AT+CGDCONT=1,"IP","lpwa.vodafone.iot"
11 OK
12
13 AT+CSCON=1
14 OK
15
16 AT+CEREG?
17 +CEREG: 4,5,"BB98","0004D1F",9,,,"00000101", "00101010"
18
19 OK
20 Registered
21
22 AT+QENG=0
23 +QENG: 0,6447,12,399,"00041D1F",-103,-12,-91,0,20,"BB98",
24 0,-128,2
```

Výpis bližšie ukazuje overenie komunikácie modulu, kde:

- AT - testovanie komunikácie s modulom,
- OK - modem je pripravený na komunikáciu.
- AT+CEREG=4 - nastavenie modulu, aby zaznamenával informácie o sietovej registrácii.
  - 4 - povoľuje registráciu siete a informácie o polohe.
- AT+CFUN=1 - nastavuje modul do plne funkčného režimu.
- AT+CGDCONT=1,IP,"lpwa.vodafone.iot"
  - 1 - číselný parameter, špecifikujúci konkrétny PDP kontext,
  - IP - typ protokolu,
  - lpwa.vodafone.iot - je Access Point Name (APN).
- AT+CSCON=1 - aktivácia indikácie stavu pripojenia k sieti.
- AT+CEREG? - zistenie stavu registrácie zariadenia v sieti.
- AT+QENG=0 - získanie technických údajov o sieti a pripojení modulu.  
Príkaz vracia údaje ako EARFCN, RSRP, RSRQ, RSSI, SINR, TAC a ďalšie.



## 6 Meranie hraničných rádiových podmienok

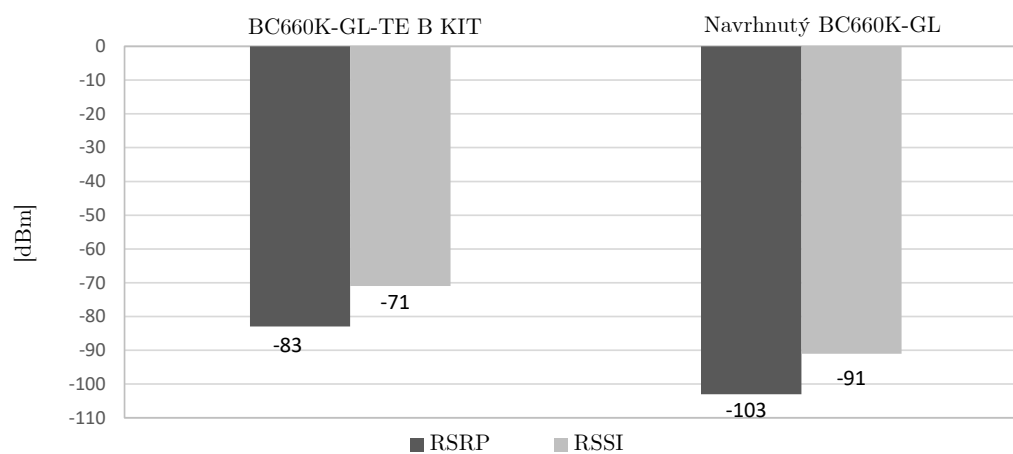
Táto kapitola je zameraná na meranie hraničných rádiových podmienok v prostredí mobilných telekomunikačných sietí. Hlavným cieľom merania bolo zistenie, ako boli signály ovplyvnené extrémnymi alebo hraničnými podmienkami a aký vplyv mali tieto podmienky na kvalitu spojenia a výkon siete. Bola vykonaná analýza signálových parametrov, ako sú RSSI, RSRP a RSRQ, SINR, TAC, ECL a Cell ID. Tieto parametre boli kritické pre hodnotenie sily a kvality prijímaného signálu v mobilných sieťach. Merania boli vykonané na piatich rozličných miestach s využitím pásma B20 (800MHz). Každé z meraní bolo vykonané opakovane pre vyššiu presnosť získaných údajov.

Pre zabezpečenie objektivity a presnosti meraní boli použité dve identické meracie zariadenia, ktoré by mali poskytnúť veľmi podobné alebo totožné výsledky. Použitím dvoch zariadení bolo umožnené lepšie posúdenie spoľahlivosti a konzistencie získaných dát, čo bolo nevyhnutné pre správne vyhodnotenie hraničných rádiových podmienok. V nasledujúcich sekciách bola podrobne popísaná metodológia merania, analýza získaných údajov a diskutované boli potenciálne odchýlky a ich dôvody, ktoré mohli vzniknúť pri použití dvoch zdanlivo identických meracích zariadení.

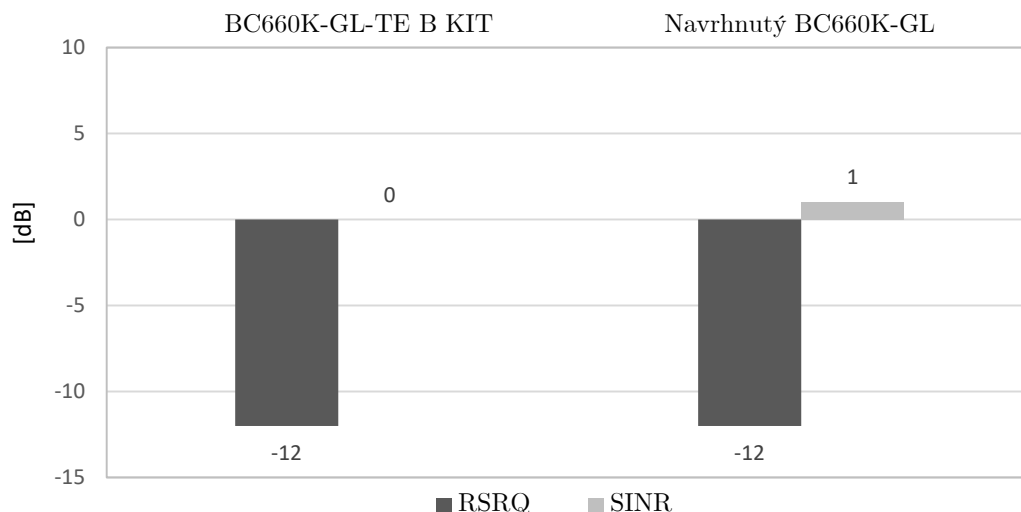
Prvou lokalitou merania boli "Purkyňové koleje", kde boli testované moduly BC660K-GL-TE B KIT a navrhnutý BC660K-GL. Oba moduly používali rovnaký rádiový kanál (EARFCN 6447) a mali rovnaký identifikátor bunky (CellID 269599) zapísaný v decimálnom tvare. Výsledky ukázali, že modul BC660K-GL-TE B KIT dosiahol lepší výkon. Konkrétne, intenzita signálu (RSRP) bola -83 dBm oproti -103 dBm u navrhnutého BC660K-GL, čo predstavuje rozdiel 20 dBm v prospech BC660K-GL-TE B KIT. Kvalita prijatého signálu (RSRQ) bola pri oboch meraných moduloch s hodnotou -12 dB. Sila prijatého signálu (RSSI) bola u BC660K-GL-TE B KIT -71 dBm, zatiaľ čo navrhnutý BC660K-GL mal -91 dBm. Celkovo teda modul BC660K-GL-TE B KIT vykazoval lepší výkon vo všetkých meraných parametroch. Z nameraných hodnôt boli vytvorené prehľadové grafy viz. Obr. 6.1 a 6.2.

Tab. 6.1: Meranie na mieste - Purkyňové koleje.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT	Navrhnutý BC660K-GL
Miesto merania	Purkyňové koleje	
EARFCN	6447	6447
$EARFCN_{offset}$	0	0
$CellID_{10}$	269599	269599
RSRP [dBm]	-83	-103
RSRQ [dB]	-12	-12
RSSI [dBm]	-71	-91
SINR [dB]	0	1
Pásmo	20	20
TAC	BB98	BB98
ECL	0	0
$Tx_{power}$ [dB]	-128	-128



Obr. 6.1: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Purkyňové koleje.

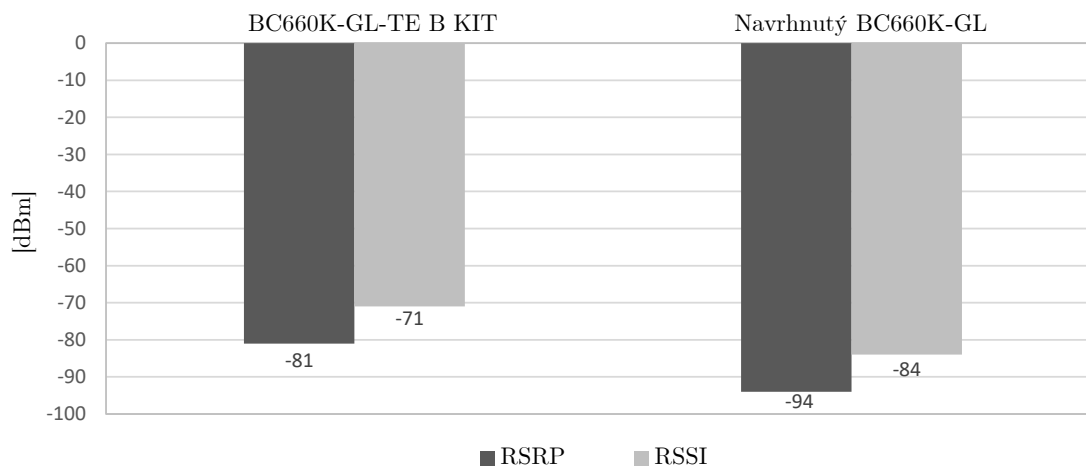


Obr. 6.2: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Purkyňove koleje.

Druhou lokalitou merania bol "Technologický park", kde boli testované spomínané moduly. Oba moduly používali rovnaký rádiový kanál (EARFCN 6447) a mali rovnaký identifikátor bunky (CellID 799521). Výsledky ukázali, že modul BC660K-GL-TE B KIT dosiahol opakovane lepší výkon. Konkrétne, intenzita signálu (RSRP) bola -81 dBm oproti -94 dBm u navrhnutého BC660K-GL, čo predstavuje rozdiel 13 dBm v prospech BC660K-GL-TE B KIT. Kvalita prijatého signálu (RSRQ) bola pri oboch meraných moduloch s hodnotou -10 dB. Sila prijatého signálu (RSSI) bola u BC660K-GL-TE B KIT -71 dBm, zatiaľ čo navrhnutý BC660K-GL mal -84 dBm. Celkovo teda modul BC660K-GL-TE B KIT vykazoval lepší výkon vo všetkých meraných parametroch. Z nameraných hodnôt boli vytvorené prehľadové grafy viz. Obr. 6.3 a 6.4.

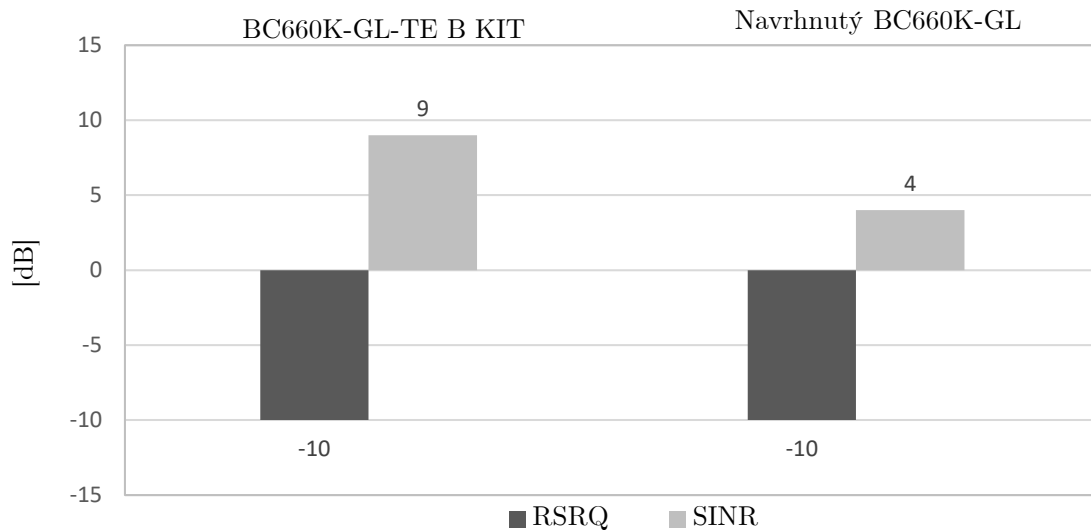
Tab. 6.2: Meranie na mieste - Technologický park.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT	Navrhnutý BC660K-GL
Miesto merania	Technologický park	
EARFCN	6447	6447
$EARFCN_{offset}$	0	0
$CellID_{10}$	799521	799521
RSRP [dBm]	-81	-94
RSRQ [dB]	-10	-10
RSSI [dBm]	-71	-84
SINR [dB]	9	4
Pásmo	20	20
TAC	BBA0	BBA0
ECL	0	0
$Tx_{power}$ [dB]	-128	-128



Obr. 6.3: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Technologický park.



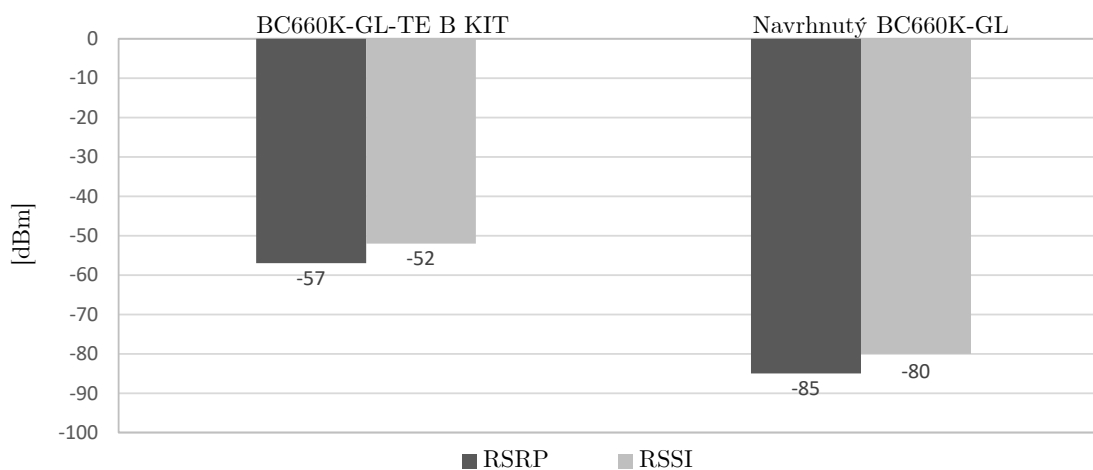


Obr. 6.4: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste Technologický park.

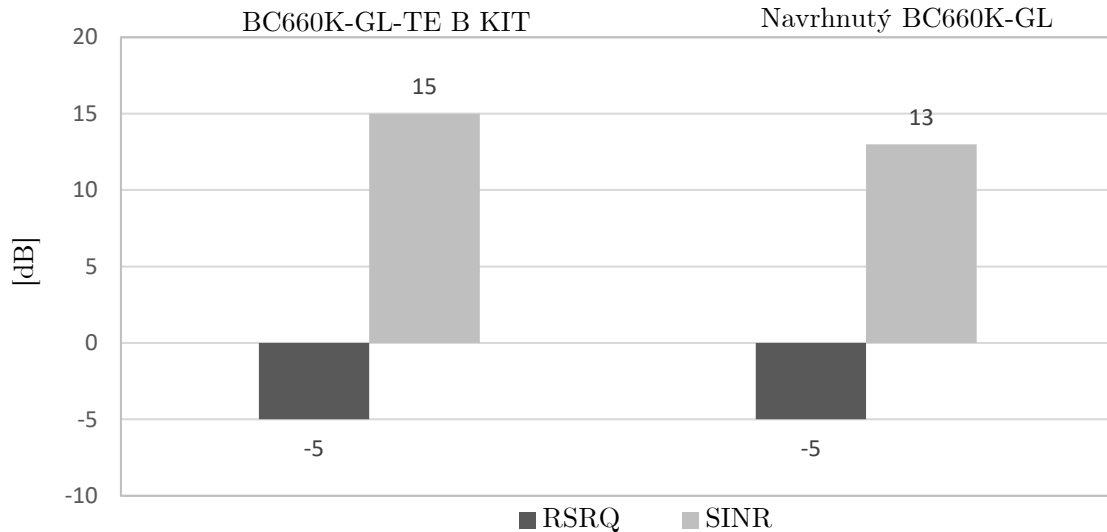
Tretie meranie bolo vykonané v centre mesta, na Českej ulici, kde boli testované spomínané moduly. Oba moduly používali rovnaký rádiový kanál (EARFCN 6447) a mali rovnaký identifikátor bunky (CellID 620831). Výsledky ukázali, že modul BC660K-GL-TE B KIT dosiahol opäť lepší výkon. Konkrétne, intenzita signálu (RSRP) bola -57 dBm oproti -85 dBm u navrhnutého BC660K-GL, čo predstavuje rozdiel 28 dBm v prospech BC660K-GL-TE B KIT. Kvalita prijatého signálu (RSRQ) bola pri oboch meraných moduloch s hodnotou -5 dB. Sila prijatého signálu (RSSI) bola u BC660K-GL-TE B KIT -52 dBm, zatiaľ čo navrhnutý BC660K-GL mal -80 dBm. Pokles hodnôt v meraní bol zapríčinený meraním v tesnej blízkosti vysielača. Celkovo teda modul BC660K-GL-TE B KIT vykazoval lepší výkon vo všetkých meraných parametroch. Z nameraných hodnôt boli vytvorené prehľadové grafy viz. Obr. 6.5 a 6.6.

Tab. 6.3: Meranie na mieste - MESTO - Česká.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT	Navrhnutý BC660K-GL
Miesto merania	MESTO - Česká	
EARFCN	6447	6447
$EARFCN_{offset}$	0	0
$CellID_{10}$	620831	620831
RSRP [dBm]	-57	-85
RSRQ [dB]	-5	-5
RSSI [dBm]	-52	-80
SINR [dB]	15	13
Pásmo	20	20
TAC	BB97	BB97
ECL	0	0
$Tx_{power}$ [dB]	-128	-128



Obr. 6.5: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Česká.

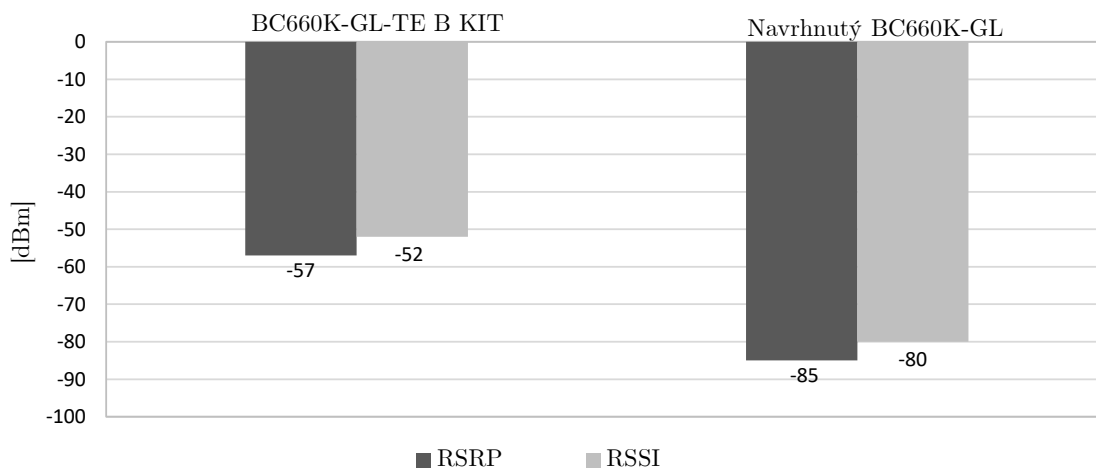


Obr. 6.6: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Česká.

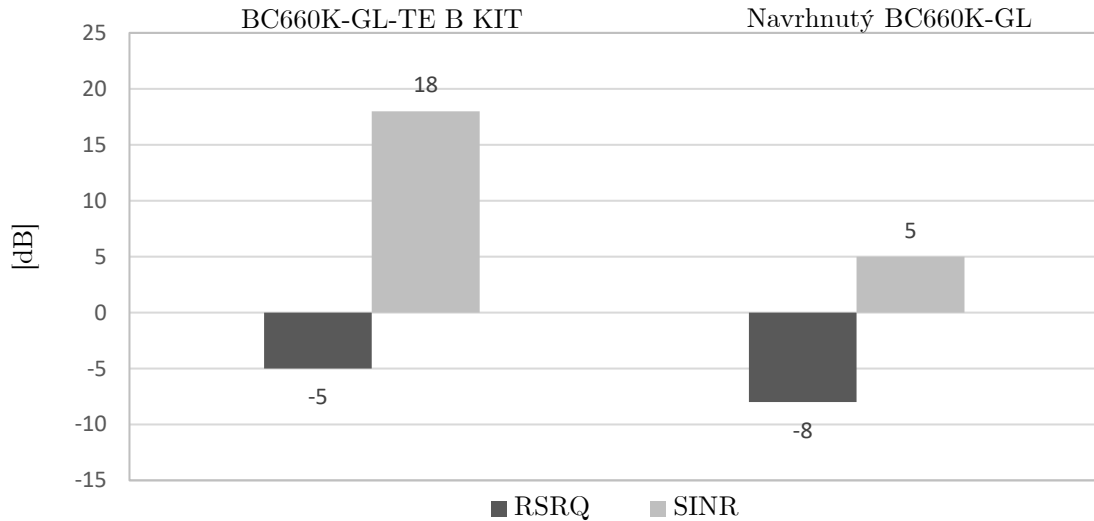
Štvrté meranie bolo vykonané v centre mesta, na Grohovej ulici, kde boli testované spomínané moduly. Oba moduly používali rovnaký rádiový kanál (EARFCN 6447) a mali rovnaký identifikátor bunky (CellID 791839). Výsledky ukázali, že modul BC660K-GL-TE B KIT dosiahol opäť lepší výkon. Konkrétne, intenzita signálu (RSRP) bola -84 dBm oproti -110 dBm u navrhnutého BC660K-GL, čo predstavuje rozdiel 26 dBm v prospech BC660K-GL-TE B KIT. Kvalita prijatého signálu (RSRQ) bola lepšia u BC660K-GL-TE B KIT s hodnotou -5 dB oproti -8 dB. Sila prijatého signálu (RSSI) bola u BC660K-GL-TE B KIT -79 dBm, zatiaľ čo navrhnutý BC660K-GL mal -102 dBm. Celkovo teda modul BC660K-GL-TE B KIT vykazoval lepší výkon vo všetkých meraných parametroch. Z nameraných hodnôt boli vytvorené prehľadové grafy viz. Obr. 6.7 a 6.8.

Tab. 6.4: Meranie na mieste - MESTO - Grohová.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT	Navrhnutý BC660K-GL
Miesto merania	MESTO - Grohová	
EARFCN	6447	6447
$EARFCN_{offset}$	0	0
$CellID_{10}$	791839	791839
RSRP [dBm]	-84	-110
RSRQ [dB]	-5	-8
RSSI [dBm]	-79	-102
SINR [dB]	18	5
Pásmo	20	20
TAC	BB98	BB98
ECL	0	0
$Tx_{power}$ [dB]	-128	-128



Obr. 6.7: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Grohová.



Obr. 6.8: Meranie hraničných rádiových podmienok na mieste MESTO - Grohová.

Poslednou lokalitou merania bola "Podzemná garáž", kde boli testované spomínané moduly. Modul BC660K-GL-TE B KIT používal rádiový kanál (EARFCN 6447) a identifikátor bunky (Cell ID 269599). Intenzita signálu (RSRP) bola -129 dBm a kvalita prijatého signálu (RSRQ) 15 dB. Sila prijatého signálu (RSSI) bola -114 dBm. Navrhnutý BC660K-GL sa nedokázal pripojiť do siete a tak nebolo možné zmerať hodnoty hraničných rádiových podmienok.

Tab. 6.5: Meranie na mieste - Podzemná garáž.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT	Navrhnutý BC660K-GL
Miesto merania	Podzemná garáž	
EARFCN	6447	/
$EARFCN_{offset}$	0	/
$CellID_{10}$	741409	/
RSRP [dBm]	-129	/
RSRQ [dB]	15	/
RSSI [dBm]	-114	/
SINR [dB]	-4	/
Pásmo	20	/
TAC	BB98	/
ECL	1	/
$Tx_{power}$ [dB]	-128	/

Nasledujúce merania boli vykonané v priestoroch učebne UniLab na Fakulte elektrotechniky a komunikačných technológií (FEKT) v Brne. Hraničné rádiové podmienky modulu boli testované pomocou softvérového nastaviteľného útlmového článku (AD-USB1AR36G95) s rozsahom 0 - 95 dB. Reálne zapojenie modulov v RF boxe je vyobrazené na Obr. 6.9 a 6.10.

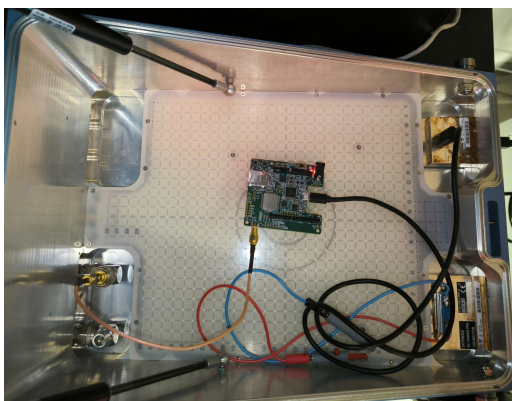
Oba moduly používali rovnaký rádiový kanál (EARFCN 6447) a mali rovnaký identifikátor bunky (CellID 1246242). Výsledky ukázali, že modul BC660K-GL-TE B KIT dosiahol lepší výkon pri všetkých testovaných útlmoch.

Pri útlmoch od 0 dB do 30 dB, viz. tabuľka 6.6 mal BC660K-GL-TE B KIT vyššie hodnoty RSRP, RSRQ a RSSI v porovnaní s navrhnutým BC660K-GL. Napríklad pri útlme 0 dB bol RSRP -79 dBm oproti -98 dBm, RSRQ -1 dB oproti -4 dB a RSSI -78 dBm oproti -94 dBm.

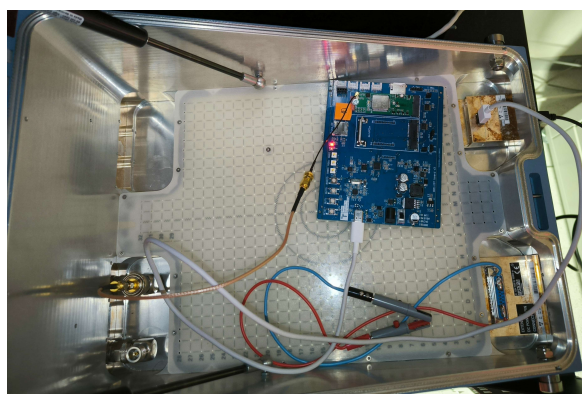
Tento trend pokračoval aj pri vyšších hodnotách útlmu. Zmenu triedy ECL pri module BC660K-GL-TE B KIT môžeme vidieť pri hodnote nastaveného útlmu 35 dB. Naopak, pri navrhnutom module to je hodnota útlmu 20 dB.

Pri útlmoch od 35 dB do 50 dB, viz. tabuľka 6.7 BC660K-GL-TE B KIT stále vykazoval lepšie hodnoty, napríklad pri útlme 35 dB bol RSRP -109 dBm oproti -128 dBm, RSRQ -3 dB oproti -9 dB a RSSI -106 dBm oproti -119 dBm. Navrhnutý BC660K-GL vykazoval výraznejší pokles signálových parametrov s rastúcim útlmom.

Pri najvyšších hodnotách útlmu od 60 dB do 95 dB, viz. tabuľka 6.8 BC660K-GL-TE B KIT naďalej preukazoval lepší výkon. Pri útlme 60 dB bol RSRP -132 dBm. Pri útlmoch 60 dB, 70 dB, 90 dB a 95 dB navrhnutý BC660K-GL už nedokázal merať hodnoty, zatiaľ čo BC660K-GL-TE B KIT stále poskytoval merateľné výsledky. Prehľadové grafické zobrazenie ponúkajú grafy na Obr. 6.11. a Obr. 6.12.



Obr. 6.9: BC660K-GL-TE B KIT.



Obr. 6.10: Navrhnutý BC660K-GL.

Tab. 6.6: Meranie v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.

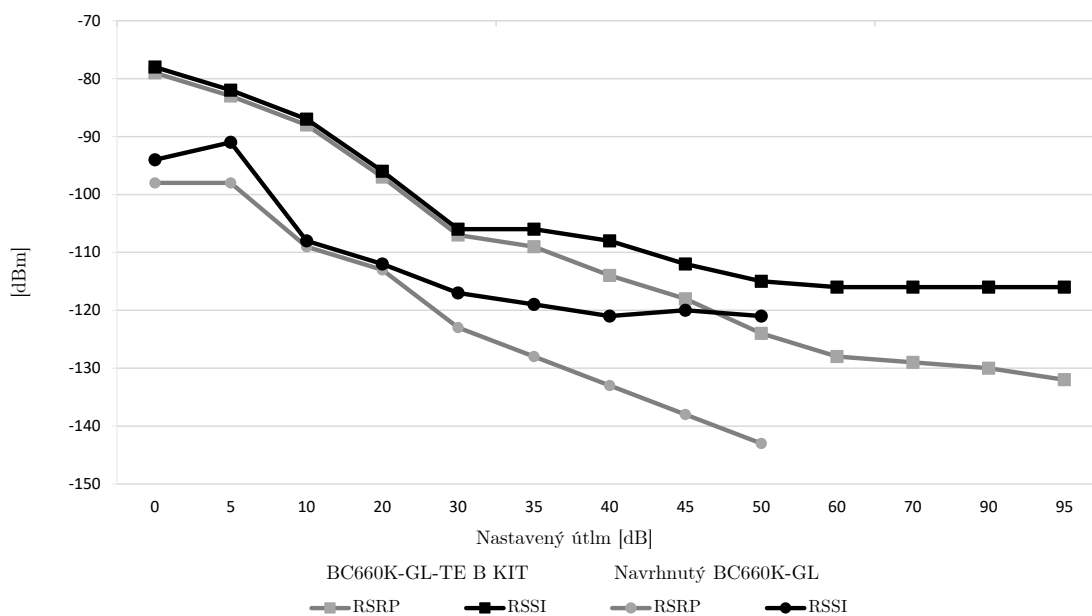
Parameter	BC660K-GL-TE B KIT					Navrhnutý BC660K-GL				
Miesto merania	RF box s nastaviteľným útlmovým článkom									
Útlm	0 dB	5 dB	10 dB	20 dB	30 dB	0 dB	5 dB	10 dB	20 dB	30 dB
EARFCN	6447	6447	6447	6447	6447	6447	6447	6447	6447	6447
$EARFCN_{offset}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CellID_{10}$	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242
RSRP [dBm]	-79	-83	-88	-97	-107	-98	-98	-109	-113	-123
RSRQ [dB]	-1	-1	-1	-1	-1	-4	-7	-1	-1	-6
RSSI [dBm]	-78	-82	-87	-96	-106	-94	-91	-108	-112	-117
SINR [dB]	22	21	19	16	18	21	21	19	17	8
Pásmo	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
TAC	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98
ECL	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$Tx_{power}$ [dB]	11	15	20	21	21	-128	-128	21	21	23

Tab. 6.7: Meranie v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.

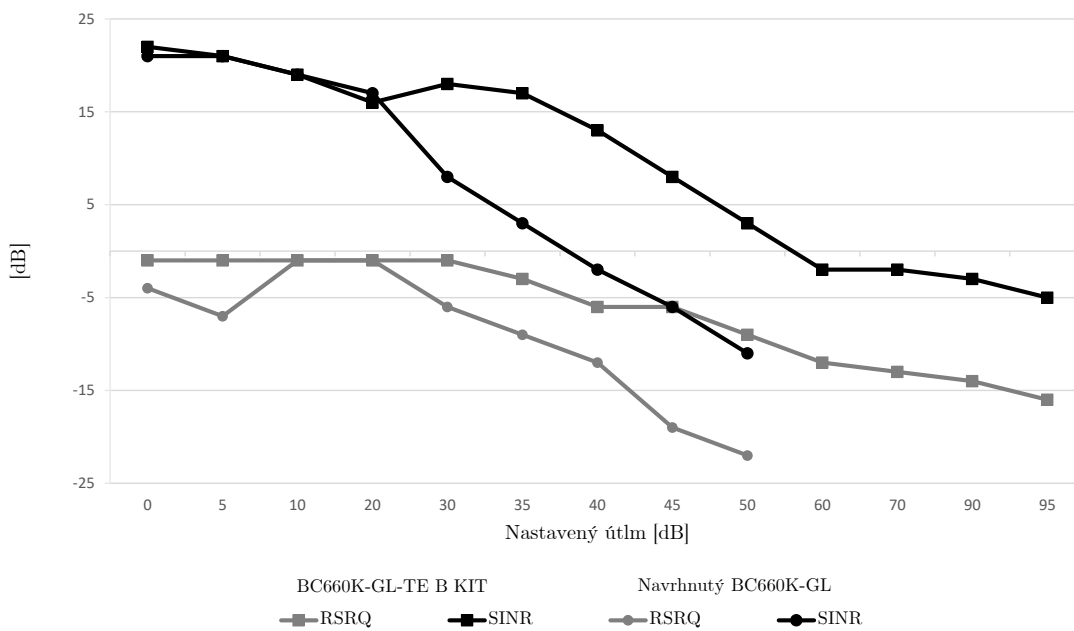
Parameter	BC660K-GL-TE B KIT				Navrhnutý BC660K-GL			
Miesto merania	RF box s nastaviteľným útlmovým článkom							
Útlm	35 dB	40 dB	45 dB	50 dB	35 dB	40 dB	45 dB	50 dB
EARFCN	6447	6447	6447	6447	6447	6447	6447	6447
$EARFCN_{offset}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$CellID_{10}$	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242	1246242
RSRP [dBm]	-109	-114	-118	-124	-128	-133	-138	-143
RSRQ [dB]	-3	-6	-6	-9	-9	-12	-18	-22
RSSI [dBm]	-106	-108	-112	-115	-119	-121	-120	-121
SINR [dB]	17	13	8	3	3	-2	-6	-11
Pásmo	20	20	20	20	20	20	20	20
TAC	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98	BB98
ECL	1	1	2	1	1	1	2	2
$Tx_{power}$ [dB]	-128	-128	22	23	23	23	23	23

Tab. 6.8: Meranie v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT				Navrhnutý BC660K-GL			
Miesto merania	RF box s nastaviteľným útlmovým článkom							
Útlm	60 dB	70 dB	90 dB	95 dB	60 dB	70 dB	90 dB	95 dB
EARFCN	6447	6447	6447	6447	/	/	/	/
$EARFCN_{offset}$	0	0	0	0	/	/	/	/
$CellID_{10}$	1246242	1246242	1246242	1246242	/	/	/	/
RSRP [dBm]	-128	-129	-130	-132	/	/	/	/
RSRQ [dB]	-12	-13	-14	-16	/	/	/	/
RSSI [dBm]	-116	-116	-116	-116	/	/	/	/
SINR [dB]	-2	-2	-3	-5	/	/	/	/
Pásmo	20	20	20	20	/	/	/	/
TAC	BB98	BB98	BB98	BB98	/	/	/	/
ECL	1	1	1	2	/	/	/	/
$Tx_{power}$ [dB]	23	23	23	23	/	/	/	/



Obr. 6.11: Meranie RSRP a RSSI v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.



Obr. 6.12: Meranie RSRQ a SINR v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.



## 6.1 Meranie prenosových rýchlostí

V tejto podkapitole sa zameriame na analýzu výkonnosti dvoch komunikačných zariadení, BC660K-GL-TE B KIT a navrhnutého BC660K-GL, ktoré boli testované v kontrolovanom prostredí RF boxu s nastaviteľným útlmovým článkom. Cieľom týchto testov bolo zistiť, ako rôzne úrovne útlmu ovplyvňujú kľúčové parametre prenosu dát, ako sú prenosová rýchlosť, latencia a strata datagramov.

RF box s nastaviteľným útlmovým článkom poskytuje ideálne prostredie na simuláciu rôznych úrovní signálového útlmu, čo nám umožňuje predpovedať správanie zariadení v rôznych podmienkach, ktoré by mohli nastať v reálnom svete.

V nasledujúcej analýze sme sa sústredili na merania pri útlmoch od 0 dB do 65 dB. Tieto údaje nám poskytujú cenné informácie o výkonnosti zariadení pri rôznych úrovniach strát signálu a umožňujú nám lepšie pochopiť obmedzenia a potenciál oboch testovaných zariadení.

Tab. 6.9: Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT					Navrhnutý BC660K-GL				
Miesto merania	RF box s nastaviteľným útlmovým článkom									
Nastavený útlm	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
RSRP [dBm]	-79	-83	-88	-92	-97	-98	-98	-109	-110	-113
SINR [dB]	22	21	19	18	16	21	21	19	18	17
Množstvo prenesených dát [kb/s]	1048	1056	1056	1056	1056	1056	1056	1056	1056	1056
Priemerná prenosová rýchlosť [kb/s]	20,2	20,7	20,2	20,2	20,4	20,4	20,3	20,1	20,1	20,1
Latencia [ms]	453,10	563,24	473,98	479,46	460,64	474,36	435,11	487,12	448,07	406,24
Strata datagramov [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ECL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 6.10: Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT				Navrhnutý BC660K-GL			
Miesto merania	RF box s nastaviteľným útlmovým článkom							
Nastavený útlm	30 dB	35 dB	40 dB	45 dB	30 dB	35 dB	40 dB	45 dB
RSRP [dBm]	-107	-109	-114	-118	-123	-128	-133	/
SINR [dB]	18	17	13	8	8	3	2	/
Množstvo prenesených dát [kb/s]	1056	1056	872	716,8	748,8	158,4	7,91	/
Priemerná prenosová rýchlosť [kb/s]	20,2	12,9	5,32	4,45	7,0	1,51	0,619	/
Latencia [ms]	368,91	524,44	921	1025,45	1090,74	2464,58	2093,65	/
Strata datagramov [%]	0	33	55	62	62	92	95	/
ECL	0	0	1	1	1	1	1	/

Tab. 6.11: Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.

Parameter	BC660K-GL-TE B KIT					Navrhnutý BC660K-GL				
	RF box s nastaviteľným útlmovým článkom									
Miesto merania	50 dB	52,5 dB	55 dB	60 dB	65 dB	50 dB	52,5 dB	55 dB	60 dB	65 dB
Nastavený útlm	50 dB	52,5 dB	55 dB	60 dB	65 dB	50 dB	52,5 dB	55 dB	60 dB	65 dB
RSRP [dBm]	-124	-124	-126	-128	-130	/	/	/	/	/
SINR [dB]	3	1	0	-2	-4	/	/	/	/	/
Množstvo prenesených dát [kb/s]	675,2	364	284,8	168,8	10,56	/	/	/	/	/
Priemerná prenosová rýchlosť [kb/s]	3,97	2,24	1,76	1,63	0,180	/	/	/	/	/
Latencia [ms]	1277,04	1119,1	1317,77	3647	-	/	/	/	/	/
Strata datagramov [%]	66	72	85	91	96	/	/	/	/	/
ECL	1	1	1	1	1	/	/	/	/	/

Rovnako ako v predchádzajúcich prípadoch, merania boli vykonané v priestoroch Unilabu. Zariadenie bolo umiestnené do RF boxu a následne pripojené k počítaču, cez ktoré bolo meranie riadené. Na PC bol pomocou programu PowerShell vytvorený UDP server, na ktorý boli posielané dáta. Komunikáciu medzi PC a modulom sprostredkoval nástroj slúžiaci na testovanie rýchlosti siete Iperf. Pre úspešnú komunikáciu s navrhnutým modulom BC660K-GL bolo nevyhnutné aktualizovať jeho firmware na verziu podporujúcu komunikáciu prostredníctvom nástroja Iperf. Modul zastával úlohu klienta a PC úlohu serveru. Pre účely merania bol využitý prístup do mobilnej siete Vodafone.

Meranie bolo uskutočnené pomocou AT príkazu:

```
AT+QIPERF=1,0,5001,"147.229.193.163",20000,1350,100,100.
```

- 1 - značí spustenie klienta,
- 0 - označuje typ protokolu UDP,
- 5001 - označuje využitý port,
- 147.229.193.163 - označuje IP adresu serveru,
- 20000 - označuje priepustnosť,
- 1350 - označuje veľkosť zataženia paketu,
- 100 - označuje počet odoslaných paketov,
- 100 - označuje dobu trvania komunikácie.

Výsledky meraní ukázali, že modul BC660K-GL-TE B KIT dosahoval lepšie prenosové rýchlosti a nižšiu latenciu v porovnaní s navrhnutým BC660K-GL.

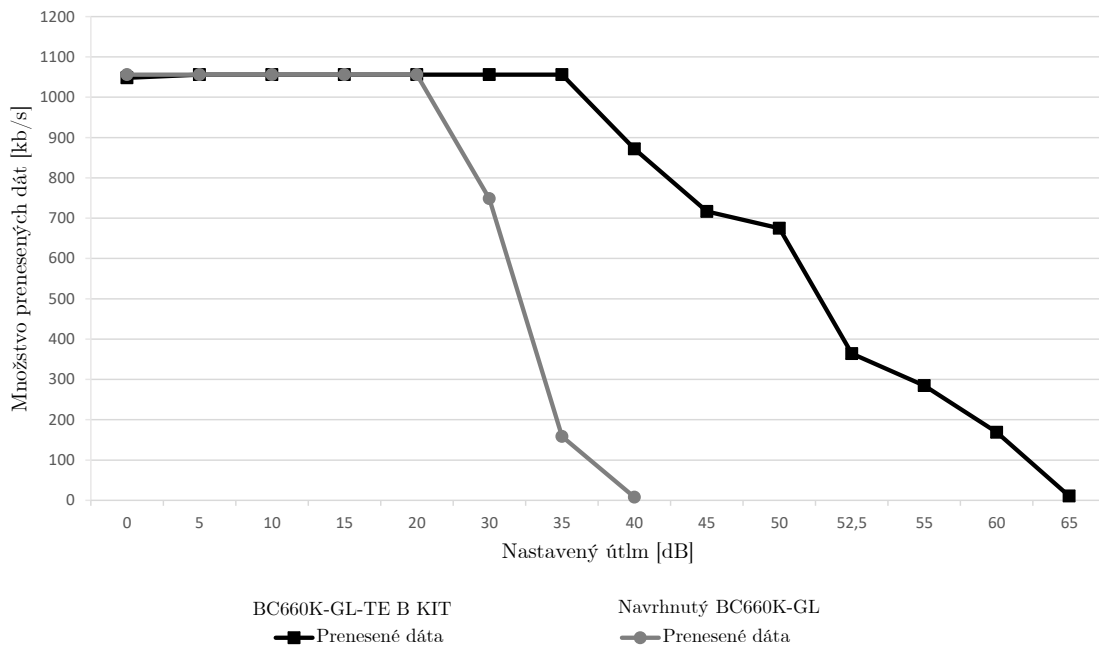
Pri útlmoch od 0 dB do 25 dB modul BC660K-GL-TE B KIT vykazoval vyššie množstvo prenosových dát a lepšiu priemernú prenosovú rýchlosť. Napríklad, pri útlme 0 dB bol dosiahnutý prenos dát 1048 kb/s, zatiaľ čo pri navrhnutom BC660K-GL to bolo 1056 kb/s. Priemerná prenosová rýchlosť bola 20,2 kb/s oproti 20,4 kb/s u navrhnutého BC660K-GL. Pri útlmoch od 30 dB do 50 dB modul BC660K-GL-TE B KIT stále vykazoval lepšie výsledky.

Pri útlme 30 dB dosiahol prenos dát 1056 kb/s, zatiaľ čo Navrhnutý BC660K-GL

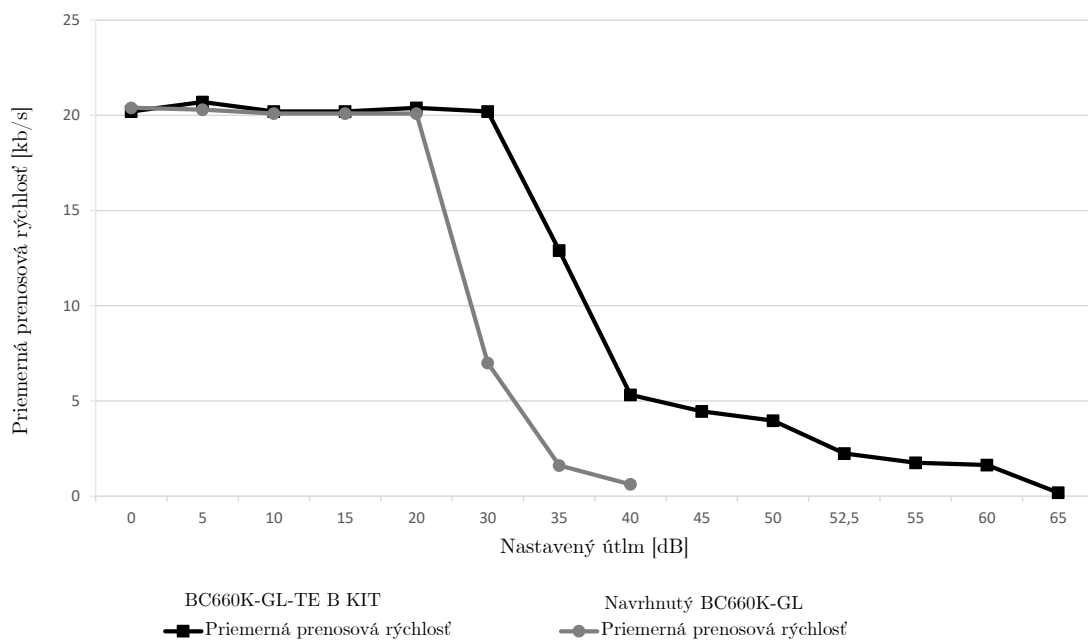
mal 748,8 kb/s. Priemerná prenosová rýchlosť bola 20,2 kb/s oproti 7,0 kb/s. Latencia pre BC660K-GL-TE B KIT bola 368,91 ms, zatiaľ čo pre navrhnutý BC660K-GL to bolo 1090,74 ms.

Pri najvyšších hodnotách útlmu od 50 dB do 65 dB modul BC660K-GL-TE B KIT naďalej vykazoval lepšie výsledky, zatiaľ čo navrhnutý BC660K-GL nedokázal merať prenosové rýchlosti pri týchto útlmoch. Pri útlme 50 dB bol dosiahnutý prenos dát 675,2 kb/s a priemerná prenosová rýchlosť 3,97 kb/s s latenciou 1277,04 ms pre BC660K-GL-TE B KIT.

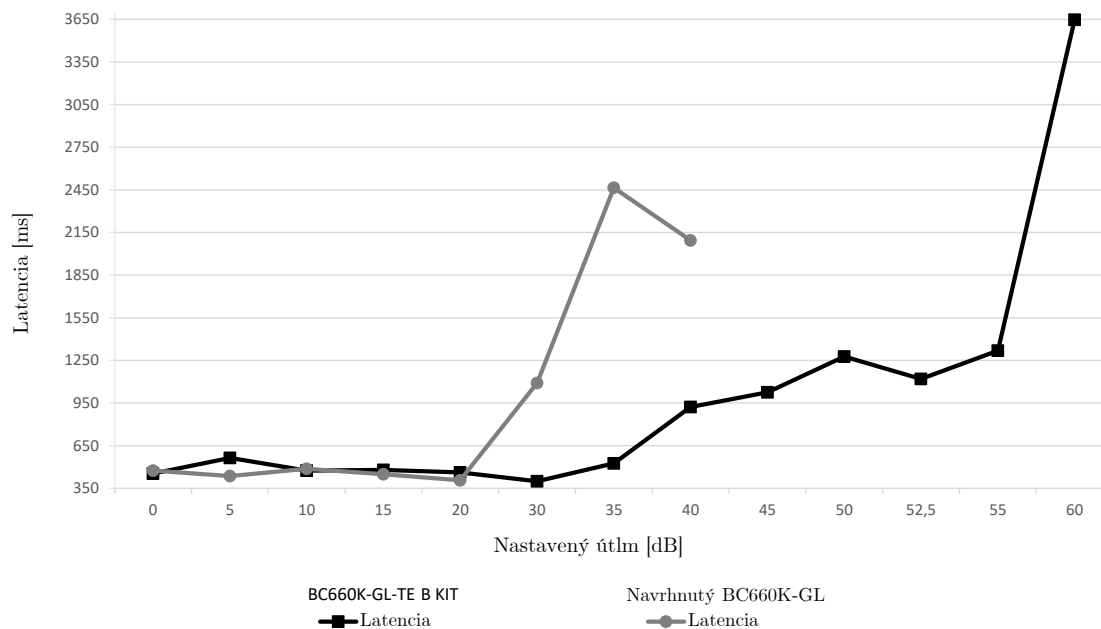
Celkový výsledok ukazuje, že modul BC660K-GL-TE B KIT má lepší výkon pri všetkých testovaných úrovniach útlmu a je efektívnejší pre použitie ako v reálnych lokalitách tak aj v priestoroch Unilabu. Navrhnutý BC660K-GL vykazoval výraznejší pokles prenosových parametrov s rastúcim útlmom, čo ukazuje na jeho nižšiu efektivitu v prostredí s vysokým útlmom. Prehľadové grafické zobrazenie ponúkajú grafy na Obr. 6.13., 6.14. a 6.15.



Obr. 6.13: Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.



Obr. 6.14: Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.



Obr. 6.15: Meranie prenosových rýchlostí v RF boxe s nastaviteľným útlmovým článkom.

# Záver

Hlavnou úlohou diplomovej práce bolo naštudovať problematiku bezdrôtového prenosu dát v rámci priemyslového internetu vecí. Práca je rozdelená do piatich kapitol. Prvá z nich popisuje IoT ako inovatívny prístup, vďaka ktorému sa zariadenia rozličných typov vzájomne prepoja cez internet, čím im umožňuje zhromažďovať a zdieľať dáta. Tento koncept nachádza uplatnenie v mnohých oblastiach - od inteligentných domácností, cez zdravotníctvo, až po priemysel. V sieti IoT zariadenia neustále zlepšujú svoju efektivitu a bezpečnosť, a sú schopné podporovať rozhodovacie a analytické procesy prostredníctvom spracovania rozsiahlych dátových súborov. Rozvoj IoT vedie k vytváraniu prepojených, inteligentných komunít, kde každodenné objekty a zariadenia sú schopné komunikovať nielen medzi sebou, ale aj s ľuďmi. Toto všetko otvára dvere novým možnostiam v technologickom rozvoji a zvyšuje kvalitu života.

Druhá a tretia kapitola sa venuje porovnaniu dvoch technológií Narrowband Internet of thing (NB-IoT) a LTE Cat-M. Pre obe technológie bol zvolený rovnaký štýl spracovávania a získavania potrebných informácií. Skúmané boli aspekty technológií od komunikačných scenárov, frekvenčných pásiem, cez operačné módy, architektúru siete až po šetriace režimy či konkrétne vydania 3GPP. NB-IoT je navrhnuté pre efektívnu komunikáciu na široké plochy s nízkou spotrebou energie, čo je ideálne pre aplikácie vyžadujúce dlhú životnosť batérie a nízku šírku pásma. Funguje v úzkom frekvenčnom pásme a poskytuje hlboký dosah v mestských a vnútorných prostrediach. LTE-M, na druhej strane, umožňuje vyššie dátové rýchlosti a mobilitu, čo ho robí vhodným pre širšie spektrum IoT aplikácií, vrátane tých, ktoré vyžadujú podporu hlasových služieb a komunikáciu v reálnom čase. Obe technológie sú kľúčové pre efektívne a škálovateľné IoT riešenia v rôznych priemyselných aplikáciách. Spomínané kapitoly sú ukončené prehľadovou tabuľkou porovnávajúcou hlavné parametre oboch technológií.

Štvrtá kapitola sa špecializuje na popis troch vybraných komunikačných modulov, ktoré poskytujú základne informácie, pre akú funkcionálnosť sú určené a akú architektúru využívajú. Opísané sú základné parametre, frekvenčné pásma a forma akou šetria energiu. Medzi vybrané komunikačné moduly sa dostal modul BG77 od spoločnosti Quectel, ktorý predstavuje inovatívne riešenie v oblasti bezdrôtovej komunikácie, ktoré kombinuje vysokú výkonnosť, nízku spotrebu energie a širokú škálu podporovaných frekvenčných pásiem. Druhým z trojice modulov je BC660K taktiež od výrobcu Quectel, ktorý je navrhnutý na komunikáciu, ktorá využíva infraštruktúry mobilných operátorov prostredníctvom rádiových protokolov NB-IoT 3GPP Vydanie 13 a 14. Tretím modulom je SIM7022 od výrobcu SIMCom, ktorý disponuje silnou rozšíriteľnosťou s veľkým výberom rozhraní, vrátane UART, GPIO

a iných. Pre následný návrh testovacej platformy bol vybratý BC660K-GL.

Praktická časť práce začína v piatej kapitole a zaoberá sa návrhom testovacej platformy, tj. dosky plošných spojov s rozhraním M.2. Kapitola rozoberá podrobný postup zapojenia testovacej platformy od návrhu zapojenia MCU, cez antennú a signalizačnú časť, až po zapojenie napájania. V rámci kapitoly bol ďalej popísaný návrh DPS s 3D vizualizáciou vyobrazený v prílohe C. Snímky navrhnutého zariadenia sú taktiež obsiahnuté v prílohách. Kapitola ďalej obsahuje overenie funkčnosti navrhnutého zariadenia pomocou AT príkazov. Pre overenie funkčnosti bola vybraná vývojová doska IoT založená na mikroprocesore RP2040. Po overení funkčnosti nasledovala séria meraní ako v laboratórnom prostredí (UniLab), tak aj v reálnych lokalitách. Merania v reálnych lokalitách boli uskutočnené na piatich rozličných miestach. Na každej lokalite mal sériovo vyrábaný modul BC660K-GL-TE B KIT lepšie hraničné rádiové parametre oproti navrhnutému. Navrhnutý modul dokázal zmerať spomínané parametre až na jednu lokalitu, a to podzemnú garáž. Možným dôvodom neúspešného pripojenia do siete a nedostupnosti potrebných údajov môže byť použitie odlišného typu antény. Nasledujúca séria meraní bola vykonaná v priestoroch učebne UniLab na Fakulte elektrotechniky a komunikačných technológií (FEKT) v Brne. Hraničné rádiové podmienky modulu boli testované pomocou softvérovo nastaviteľného útlmového článku s rozsahom 0 - 95 dB, a meranie bolo vykonané v RF boxe. Sériovo vyrábaný modul opakovane dosahoval lepšie hraničné parametre v celom rozsahu nastavovaného útlmu. Navrhnutý modul dokázal merať až do hodnoty útlmu 50 dB pri ktorom dosahoval hodnotu RSRP -143 dBm, od ktorej sa už nedokázal registrovať do siete. Poslednou sériou meraní boli prenosové rýchlosti pri rozličných útlmoch. Výsledky meraní ukázali, že modul BC660K-GL-TE B KIT dosahoval lepšie prenosové rýchlosti a nižšiu latenciu v porovnaní s navrhnutým BC660K-GL. Navrhnutý modul dokázal merať až do 40 dB.

Celkový výsledok ukazuje, že modul BC660K-GL-TE B KIT má lepší výkon pri všetkých testovaných úrovniach útlmu a je efektívnejší ako v reálnych lokalitách tak aj v priestoroch Unilabu. Navrhnutý BC660K-GL vykazoval výraznejší pokles prenosových parametrov s rastúcim útlmom, čo ukazuje na jeho nižšiu efektivitu v prostredí s vysokým útlmom.

Jedným z možných dôvodov horších vlastností navrhnutého modulu je využitie odlišného typu antény. Dôvodom horších nameraných hodnôt môže byť taktiež fakt, že modul BC660K-GL-TE B KIT je sériovo vyrábaný a vďaka tomu ponúka lepšiu optimalizáciu a kvalitnejšie vlastnosti pre meranie hraničných rádiových podmienok.

## Literatúra

- [1] Michal Lom and Ondrej Pribyl. Síťe pro internet věcí v České republice, 2023. [cit. 2023-11-11]. URL: <https://elektro.tzb-info.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internet-veci-v-ceske-republice>.
- [2] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, and Seung-Hoon Hwang. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot. *ICT Express*, 3(1):14–21, 2017. [cit. 2023-11-12]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>, doi:10.1016/j.icte.2017.03.004.
- [3] Hyowoon Seo, Jun-Pyo Hong, and Wan Choi. Low latency random access for sporadic mtc devices in internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3):5108–5118, 2019. [cit. 2023-11-08]. doi:10.1109/JIOT.2019.2896620.
- [4] Teshager Hailemariam Moges, Demeke Shumeye Lakew, Ngoc Phi Nguyen, Nhu-Ngoc Dao, and Sungrae Cho. Cellular internet of things: Use cases, technologies, and future work. *Internet of Things*, 24:100910, 2023. [cit. 2023-11-08]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660523002330>, doi:10.1016/j.iot.2023.100910.
- [5] Nurul Huda Mahmood, Nikolaj Marchenko, Mikael Gidlund, and Petar Popovski. *Wireless Networks and Industrial IoT*. Springer, 2020. [cit. 2023-11-08].
- [6] Justus Baron and Kirti Gupta. Unpacking 3gpp standards. *Journal of Economics & Management Strategy*, 27(3):433–461, 2018. [cit. 2023-11-20]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jems.12258>.
- [7] Almudena Díaz Zayas and Pedro Merino. The 3gpp nb-iot system architecture for the internet of things. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 277–282, 2017. [cit. 2023-10-08]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7962670>, doi:10.1109/ICCW.2017.7962670.
- [8] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*, 5(1):1–7, 2019. [cit. 2023-11-30].
- [9] Matthieu Kanj, Vincent Savaux, and Mathieu Le Guen. A tutorial on nb-iot physical layer design. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4):2408–2446, 2020. [cit. 2023-11-11]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9194757>.

- [10] Y.-P. Eric Wang, Xingqin Lin, Ansuman Adhikary, Asbjorn Grovlen, Yutao Sui, Yufei Blankenship, Johan Bergman, and Hazhir S. Razaghi. A primer on 3gpp narrowband internet of things. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):117–123, 2017. [cit. 2023-11-20]. doi:10.1109/MCOM.2017.1600510CM.
- [11] Nb-iot / lte cat nb1. Halberd Bastion, 2020. [cit. 2023-11-11]. URL: <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/nb-iot-lte-cat-nb1>.
- [12] Pavel Masek, Martin Stusek, Radek Fujdiak, Petr Mlynek, and Jiri Hosek. Komunikační systémy pro iot. Technical report, Ústav radioelektroniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, Technická 3058/10, 616 00 Brno, Česká republika, 2020. [cit. 2023-11-11].
- [13] Jinseong Lee and Jaiyong Lee. Prediction-based energy saving mechanism in 3gpp nb-iot networks. *Sensors*, 17(9):2008, 2017. [cit. 2023-12-03].
- [14] Eshita Rastogi, Navrati Saxena, Abhishek Roy, and Dong Ryeol Shin. Narrowband internet of things: A comprehensive study. *Computer Networks*, 173:107209, 2020. [cit. 2023-11-08]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619313593>, doi:10.1016/j.comnet.2020.107209.
- [15] Joseph Finnegan and Stephen Brown. A comparative survey of lpwa networking. *arXiv preprint arXiv:1802.04222*, 2018. [cit. 2023-11-30].
- [16] GSM Association. *NB-IoT Deployment Guide – Release 2*. GSMA, Londýn, Spojené královstvo, April 2018. [cit. 2023-11-20]. URL: <https://www.gsma.com/iot/nbiot-deployment-guide-v2/>.
- [17] J Schlienzen and D Raddino. Narrowband internet of things whitepaper. *White Paper, Rohde&Schwarz*, pages 1–42, 2016. [cit. 2023-11-30]. URL: [https://cdn.rohde-schwarz.com.cn/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma266/1MA266\\_0e\\_NB\\_IoT.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com.cn/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf).
- [18] Rubbens Boisguene, Sheng-Chia Tseng, Chih-Wei Huang, and Phone Lin. A survey on nb-iot downlink scheduling: Issues and potential solutions. In *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pages 547–551. IEEE, 2017. [cit. 2023-11-11]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7986344>.
- [19] Andreas Høglund, Johan Bergman, Xingqin Lin, Olof Liberg, Antti Ratilainen, Hazhir Shokri Razaghi, Tuomas Tirronen, and Emre A. Yavuz. Overview



- of 3gpp release 14 further enhanced mtc. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2(2):84–89, 2018. [cit. 2023-12-03]. doi:10.1109/MCOMSTD.2018.1700050.
- [20] Almudena Díaz Zayas and Pedro Merino. The 3gpp nb-iot system architecture for the internet of things. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 277–282, 2017. [cit. 2023-11-30]. doi:10.1109/ICCW.2017.7962670.
- [21] Ashish Kumar Sultania, Pouria Zand, Chris Blondia, and Jeroen Famaey. Energy modeling and evaluation of nb-iot with psm and edrx. In *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–7, 2018. [cit. 2023-11-30]. doi:10.1109/GLOCOMW.2018.8644074.
- [22] TRUSTED IoT. 3gpp low power wide area technologies. *GSMA White Paper downloaded Mar*, 11:49, 2018. [cit. 2023-11-30].
- [23] Twilio. Low power optimization for cellular modules. Twilio Docs, 2023. [cit. 2023-12-03]. URL: <https://www.twilio.com/docs/iot/supersim/low-power-optimization-for-cellular-modules>.
- [24] Almudena Díaz Zayas, Francisco Javier Rivas Tocado, and Pilar Rodríguez. Evolution and testing of nb-iot solutions. *Applied Sciences*, 10(21):7903, 2020. [cit. 2023-11-08].
- [25] Andreas Høglund, Xingqin Lin, Olof Liberg, Ali Behravan, Emre A. Yavuz, Martin Van Der Zee, Yutao Sui, Tuomas Tirronen, Antti Ratilainen, and David Eriksson. Overview of 3gpp release 14 enhanced nb-iot. *IEEE Network*, 31(6):16–22, 2017. [cit. 2023-11-08]. doi:10.1109/MNET.2017.1700082.
- [26] Harri Holma, Rapeepat Ratasuk, and Mads Lauridsen. Internet of things optimization. *5 G Technology: 3 GPP New Radio*, pages 431–459, 2020. [cit. 2023-11-30].
- [27] Mikhaylov Konstantin, Fujdiak Radek, Stusek Martin, Masek Pavel, Ahmed Ijaz, Malina Lukas, Parambage Pawani, Voznak Miroslav, Pouttu Ari, and Mlynek Petr. *Security in Low Power Wide Area Networks: state-of-the-art and development towards the 5G*, pages 1–25. Brno University of Technology, Technická 12, Brno 61600 Czech Republic and University of Oulu, Erkki Koiso-Kanttilan katu 3, Oulu 90014 Finland and Technical University of Ostrava, 17. listopadu 15/2172, Ostrava 70800 Czech Republic and VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, Espoo 02150 Finland, July 2019. [cit. 2024-05-10].

- [28] Elena Murakhveri, Ceyda Oztekin, et al. Architecture specification for isolated mpn. Technical report, Vodafone, 2023. [cit. 2024-05-10].
- [29] Afnan Alamayreh, Andrea Martinetti, Patricia Taboada, Gianluca Rossetto, and Maurizio Rosso. Ran sharing with dedicated mpn 2.0 – blueprint doc. Technical report, Vodafone, March 2023. [cit. 2024-05-10].
- [30] Bharat S Chaudhari and Marco Zennaro. *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Academic Press, 2020. [cit. 2023-12-07]. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128188804/lpwan-technologies-for-iot-and-m2m-applications>.
- [31] 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, 2018. [cit. 2023-11-30]. doi:10.1109/PERCOMW.2018.8480255.
- [32] SATISH Chalapati. Comparison of lpwa technologies and realizable use cases. In *Fall Tech. Forum*, volume 2018, pages 1–12, 2018. [cit. 2023-11-30].
- [33] Telia first to launch lte-m in denmark, 2020. [cit. 2023-11-30]. URL: <https://business.teliacompany.com/blog/telia-first-to-launch-lte-m-in-denmark>.
- [34] GSMA. Lte-m deployment guide to basic feature set requirements, 2019. [cit. 2023-11-30]. URL: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2019/08/201906-GSMA-LTE-M-Deployment-Guide-v3.pdf>.
- [35] Olof Liberg, Marten Sundberg, Eric Wang, Johan Bergman, and Joachim Sachs. *Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance*. Academic Press, 2017. [cit. 2023-11-30].
- [36] GSMA. Lte-m deployment guide. Technical report, GSM Association, April 2018. [cit. 2023-11-08]. URL: [https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2018/04/LTE-M\\_Deployment\\_Guide\\_v2\\_5Apr2018.pdf](https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2018/04/LTE-M_Deployment_Guide_v2_5Apr2018.pdf).
- [37] Pavel Masek, Martin Stusek, Krystof Zeman, Roman Drapela, Aleksandr Ometov, and Jiri Hosek. Implementation of 3gpp lte cat-m1 technology in ns-3: System simulation and performance. In *2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, pages 1–7, 2019. [cit. 2023-11-30]. doi:10.1109/ICUMT48472.2019.8970869.

- [38] Suresh R. Borkar. 7 - long-term evolution for machines (lte-m). In Bharat S. Chaudhari and Marco Zennaro, editors, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, pages 145–166. Academic Press, 2020. [cit. 2023-11-30]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128188804000077>, doi:10.1016/B978-0-12-818880-4.00007-7.
- [39] Ruslan Belyaev. Scef for iot, August 2019. [cit. 2023-11-11]. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/scef-iot-ruslan-belyaev>.
- [40] Borja Martinez, Ferran Adelantado, Andrea Bartoli, and Xavier Vilajosana. Exploring the performance boundaries of nb-iot. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3):5702–5712, 2019. [cit. 2023-11-25]. doi:10.1109/JIOT.2019.2904799.
- [41] Borja Martinez, Ferran Adelantado, Andrea Bartoli, and Xavier Vilajosana. Exploring the performance boundaries of nb-iot. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3):5702–5712, 2019. [cit. 2023-11-07].
- [42] Andreas Høglund, Johan Bergman, Xingqin Lin, Olof Liberg, Antti Ratilainen, Hazhir Shokri Razaghi, Tuomas Tirronen, and Emre A. Yavuz. Overview of 3gpp release 14 further enhanced mtc. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2(2):84–89, 2018. [cit. 2023-11-30]. doi:10.1109/MCOMSTD.2018.1700050.
- [43] Janne Peisa, Patrik Persson, Stefan Parkvall, Erik Dahlman, Asbjørn Grøvlén, Christian Hoymann, and Dirk Gerstenberger. 5g evolution: 3gpp releases 16 & 17 overview. *Ericsson Technology Review*, 2020(2):2–13, 2020. [cit. 2024-02-01].
- [44] RCR Wireless News. What nb-iot, lte-mtc enhancements are in release 17. *RCR Wireless News*, March 2022. [cit. 2023-11-09]. URL: <https://www.rcrwireless.com/20220322/5g/what-nbiot-lte-mtc-enhancements-are-release-17>.
- [45] Xingqin Lin. An overview of 5g advanced evolution in 3gpp release 18. *IEEE Communications Standards Magazine*, 6(3):77–83, 2022. [cit. 2023-11-08].
- [46] Devopedia. 3gpp release, 2022. [cit. 2024-02-01]. URL: <https://devopedia.org/3gpp-release>.
- [47] Quectel. Quectel bg77 hardware design v1.3. Online, 2023. [cit. 2023-11-07]. URL: [https://images.quectel.com/python/2023/04/Quectel\\_BG77\\_Hardware\\_Design\\_V1.3.pdf](https://images.quectel.com/python/2023/04/Quectel_BG77_Hardware_Design_V1.3.pdf).
- [48] Lte bg77 cat m1 nb2 - quectel. <https://www.quectel.com/product/lte-bg77-cat-m1-nb2>. [cit. 2023-11-05].

- [49] Quectel. *Quectel BC660K-GL Hardware Design*, 2023. Accessed: 2023-11-17. URL: [https://www.quectel.com/download/quectel\\_bc660k-gl\\_hardware\\_design\\_v1-0](https://www.quectel.com/download/quectel_bc660k-gl_hardware_design_v1-0).
- [50] SIMCom. *SIM7022 Hardware Design - SIMCom*, 2021. Accessed: 2023-11-17. URL: <https://en.simcom.com/product/SIM7022.html>.
- [51] Ltd. Quectel Wireless Solutions Co. *BC660K-GL Hardware Design*. Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., Shanghai, China, June 2021. Document is released and available for use under conditions specified by Quectel. URL: [https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/04/Quectel\\_BC660K-GL\\_Hardware\\_Design\\_V1.0.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/04/Quectel_BC660K-GL_Hardware_Design_V1.0.pdf).
- [52] HE Clifton. BC660K-GL Reference Design. Technical report, Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., Building 5, Shanghai Business Park Phase III (Area B), No.1016 Tianlin Road, Minhang District, Shanghai 200233, China, January 2021. [cit. 2024-05-10]. URL: [https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/04/Quectel\\_BC660K-GL\\_Hardware\\_Design\\_V1.1.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/04/Quectel_BC660K-GL_Hardware_Design_V1.1.pdf).

# Zoznam symbolov a skratiek

## Skratky:

<b>3GPP</b>	The 3rd Generation Partnership Project
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard
<b>AKA</b>	Authentication and Key Agreement
<b>AMF</b>	Access and Mobility Management Function
<b>ANR</b>	Automatic Neighbour Relation
<b>APN</b>	Access Point Name
<b>AS</b>	Access Stratum
<b>AV</b>	Authentication Vector
<b>CA</b>	Carrier Aggregation
<b>C-SGN</b>	CIoT Serving Gateway Node
<b>CIoT</b>	Cellular Internet of Things
<b>CK</b>	Ciphering Key
<b>CM</b>	Counter Mode
<b>CMAC</b>	Cipher-based Message Authentication Code
<b>DCI</b>	Downlink Control Information
<b>D2D</b>	Device-to-Device
<b>DFOTA</b>	Firmware Over-The-Air
<b>DONAS</b>	Data-over-NAS
<b>DRX</b>	Discontinuous Reception
<b>eDRX</b>	Extended Discontinuous Reception
<b>ECL</b>	Coverage Enhancement Level
<b>EDGE</b>	Enhanced Data rates for GSM Evolution
<b>ECID</b>	Enhanced Cell Identifier

<b>EARFCN</b>	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
<b>EDT</b>	Early data transmission
<b>eMBB</b>	enhanced Mobile Broadband
<b>eMTC</b>	enhanced Machine Type Communication
<b>eNodeB</b>	Evolved Node B
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>feMTC</b>	further enhanced Machine Type Communication
<b>GDSP</b>	Global Data Service Platform
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>H-FDD</b>	Frequency Division Duplexing
<b>HMAC</b>	Hash-based message authentication code
<b>HSPA</b>	High-Speed Packet Access
<b>HSPA+</b>	Evolved High-Speed Packet Acces
<b>HW</b>	Hardware
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IK</b>	Integrity Key
<b>IMEI</b>	International Mobile Equipment Identity
<b>IMSI</b>	International Mobile Subscriber Identity
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IR-HARQ</b>	Incremental Redundancy Hybrid Automatic Repeat reQuest
<b>KDF</b>	Key Derivation Function
<b>LAC</b>	Location Area Code
<b>LGA</b>	Land Grid Array

<b>LPWAN</b>	Low-power wide-area network
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LTE-M</b>	LTE for Machines
<b>M2M</b>	Machine-to-Machine
<b>MBMS</b>	Multimedia Broadcast/Multicast Services
<b>MIC</b>	Message Integrity Code
<b>MIMO</b>	Multiple-input multiple-output
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>mMTC</b>	Massive Machine-Type Communications
<b>MOCN</b>	Multi-Operator Core Network
<b>MORAN</b>	Multi-Operator Radio Access Network
<b>MPN</b>	Mobile Private Network
<b>MQTT</b>	Message Queuing Telemetry Transport
<b>MT</b>	Mobile-terminated
<b>MTC</b>	Machine-type Communication
<b>NAS</b>	Non Access Stratus
<b>NB-IoT</b>	Narrowband Internet of things
<b>NPRACH</b>	Narrowband Physical Random Access Channel
<b>NPRS</b>	Narrowband Positioning Reference Signal
<b>NR</b>	New Radio
<b>NRF</b>	Network Repository Function
<b>NSSF</b>	Network Slice Selection Function
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>OpCo</b>	Operating Company
<b>OTDOA</b>	Observed Time Difference of Arrival

<b>PGW</b>	Packet Data Network Gateway
<b>PPP</b>	Point-to-Point Protocol
<b>Prose</b>	Proximity Service
<b>PSM</b>	Power Saving Mode
<b>pTAU</b>	Periodic Tracking Area Update
<b>PTT</b>	Push to Talk
<b>PTW</b>	Paging Transmission Window
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RAN</b>	Radio Access Network
<b>RAND</b>	Random Number
<b>RB</b>	Resource Block
<b>RLF</b>	Radio Link Failure
<b>RRC</b>	Radio Resource Control
<b>RSRP</b>	Reference Signal Received Power
<b>RSRQ</b>	Reference Signal Received Quality
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator
<b>S1-C</b>	Control plane S1 based on the SIAP protocol
<b>SC-FDMA</b>	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
<b>SCEF</b>	Service Capability Exposure Function
<b>SC-MCCH</b>	Single Cell Multicast Control Channel
<b>SC-MTCH</b>	Single Cell Multicast Traffic Channel
<b>SC-PTM</b>	Single-cell Point-to-Multipoint
<b>SCS</b>	Service Capability Server
<b>SeGW</b>	Security Gateway
<b>SGW</b>	Serving Gateway



<b>SMD</b>	Surface Mount Device
<b>SMF</b>	Session Management Function
<b>SN ID</b>	Serving Network Identifier
<b>SIAP</b>	Session Initiation Application Part
<b>SON</b>	Self-Organizing Networks
<b>SQN</b>	Sequence Number
<b>TAC</b>	Tracking Area Code
<b>Tau</b>	Tracking Area Update
<b>TBS</b>	Transport Block Size
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TDD</b>	Time Division Duplexing
<b>TMSI</b>	Temporary Mobile Subscriber Identity
<b>TTI</b>	Transmission Time Interval
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>UE</b>	User Equipment
<b>UICC</b>	Universal Integrated Circuit Card
<b>UM</b>	Unacknowledged mode
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunication System
<b>URLLC</b>	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
<b>VGE</b>	Voice Group Call Service on E-UTRAN
<b>WUS</b>	Wake-Up Signal
<b>WWAN</b>	Wireless Wide Area Network
<b>XRES</b>	Expected Response
<b>ZUC</b>	ZUC Encryption Algorithm

**Symboly:**

$\Omega$	Ohm
$^{\circ}\text{C}$	Celsius degrees
<b>B</b>	Byte
<b>b/s</b>	Bits per second
<b>dB</b>	Decibel
<b>dBm</b>	Decibel-milliwatt
<b>Hz</b>	Hertz
<b>kHz</b>	Kilohertz
<b>km</b>	Kilometer
<b>kb/s</b>	Kilobits per second
<b>kB/s</b>	Kilobyte per second
<b>Mb/s</b>	Megabits per second
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>mm</b>	Millimeter
<b>ms</b>	Milisecond
<b>nA</b>	nanoAmpere
<b>s</b>	Second
<b>V</b>	Volt
<b><math>\mu\text{s}</math></b>	Microsecond

# Zoznam príloh

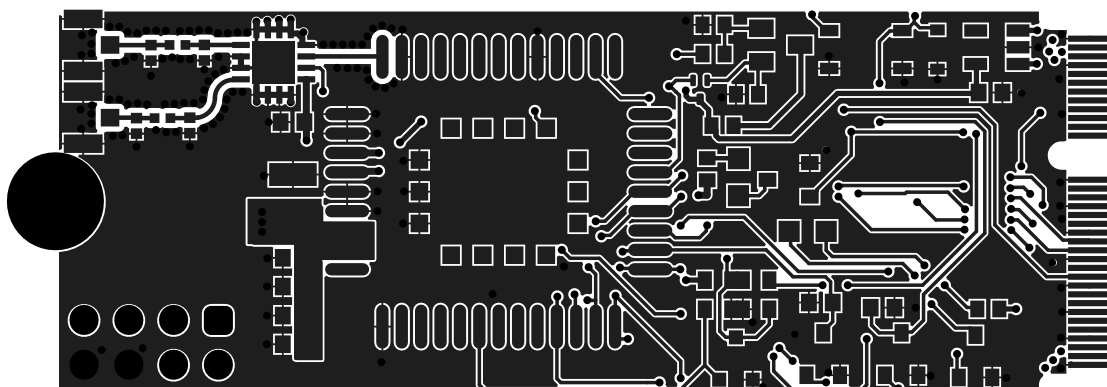
A	Technická dokumentácia - Schéma	125
B	Technická dokumentácia - DPS	127
C	Technická dokumentácia - 3D DPS	129
D	Zoznam súčiastok z programu Altium Designer	131
E	Obsah elektronickej prílohy	133



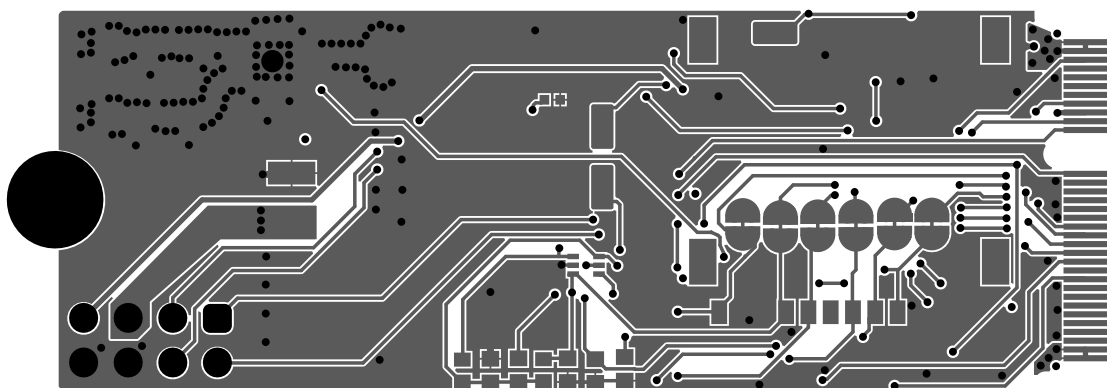




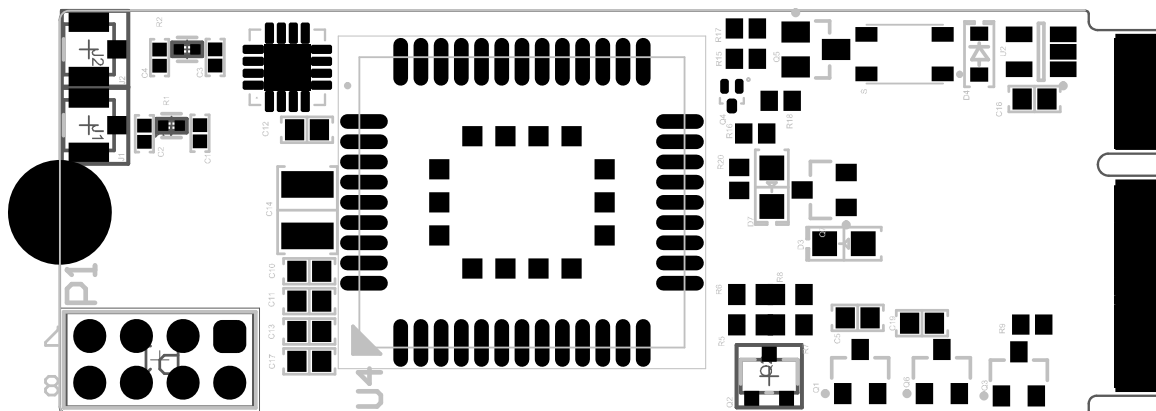
## B Technická dokumentácia - DPS



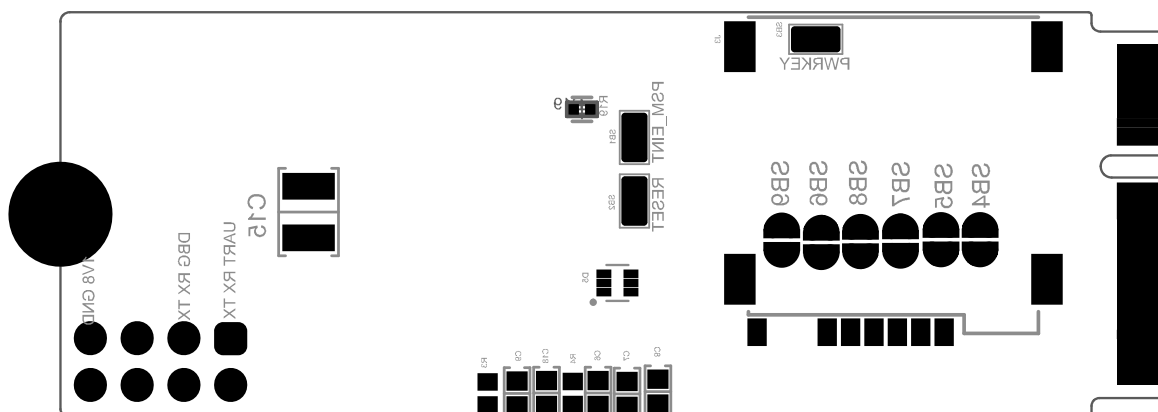
Obr. B.1: DPS - vrstva TOP



Obr. B.2: DPS - vrstva BOTTOM



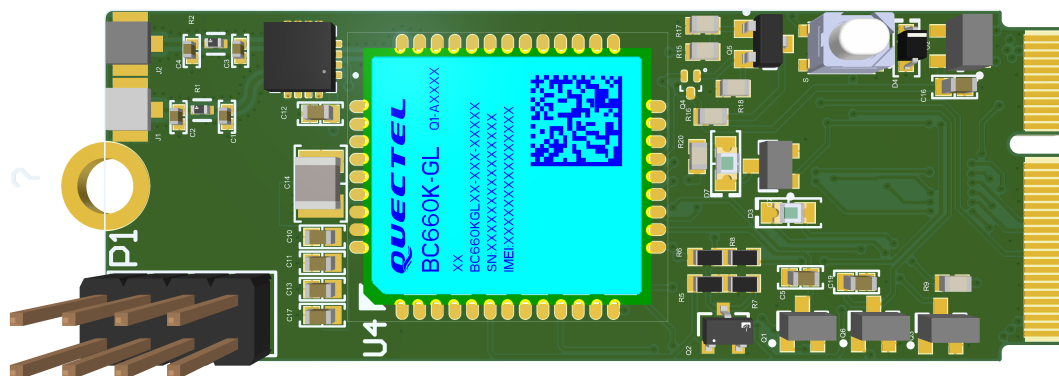
Obr. B.3: Osadenie súčiastok - vrstva TOP



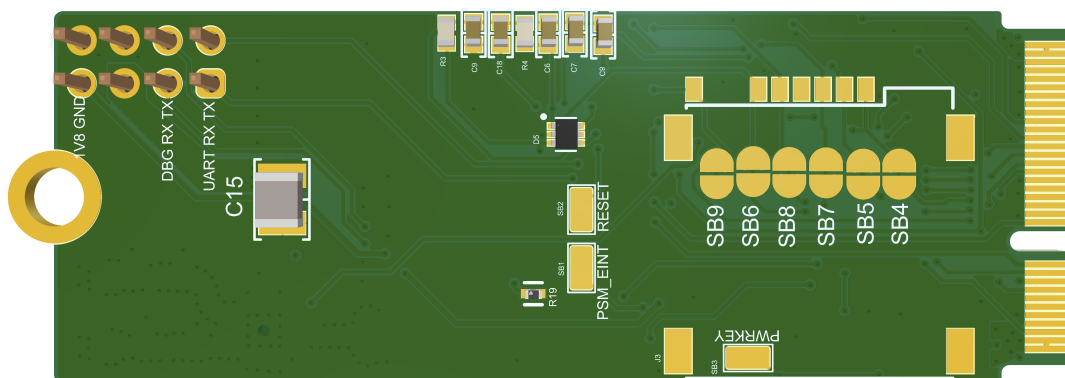
Obr. B.4: Osadenie súčiastok - vrstva BOTTOM



## C Technická dokumentácia - 3D DPS



Obr. C.1: 3D DPS - vrstva TOP



Obr. C.2: 3D DPS - vrstva BOTTOM



# D Zoznam súčiastok z programu Altium Designer

Tab. D.1: Zoznam súčiastok z programu Altium Designer.

Číslo	Popis	Komponent	Referencia	Hodnota	ks
1	Rádiofrekvenčný prepínač	A-HMC349ALP4ce	*		1
2	M.2	J-M.2-E <sub>2</sub> 260			1
3	Keramický kondenzátor	04023C104KAT2A-62	C1, C2, C3, C4	100 nF	4
4	Keramický kondenzátor	06036C104JAT2A	C5, C19	0.1 uF	2
5	Keramický kondenzátor	CL10B104KB8NNWC	C6, C7, C8, C9, C12, C13, C18	0.1 uF	7
6	Keramický kondenzátor	C0603C220M4RACAUTO	C10	22 pF	1
7	Keramický kondenzátor	C0603C101K4RAC7867	C11	100 pF	1
8	Keramický kondenzátor	JMK325BJ107MM-T	C14, C15	100 uF	2
9	LED dióda	LED GREEN CLEAR SMD	D3, D7	GREEN	2
10	TVS dióda	ESD7351HT1G	D4		1
11	TVS dióda	D-ESDA6V8AV6	D5		1
12	RF konektor	U.FL-R-SMT	J1, J2		2
13	Modul	SIM7100-6-1-15-00-A <sub>R</sub> EVC	J3		1
14	Pinový konektor	61300821121	P1		1
15	PNP tranzistor	MUN2233T1G	Q1, Q3, Q6, Q7		4
16	N-kanálový MOSFET	AO3400A	Q2		1
17	P-kanálový MOSFET	RUM001L02T2CL	Q4		1
18	NPN tranzistor	MMBT3904	Q5		1
19	Rezistor	Jumper	R1, R2, R19	0 Ω	3
20	Rezistor	RESC1609X50X30NL10T20	R3, R4	15 kΩ	2
21	Rezistor	RESC1608X55X25ML10T15	R5, R6	10 kΩ	2
22	Rezistor	RESC1608X55X25ML10T15	R7, R8	0 Ω	2
23	Rezistor	RESC1609X50X30NL10T20	R9, R20	2.2 kΩ	2
24	Rezistor	RESC1609X50X30NL10T20	R15, R16	10 kΩ	2
25	Rezistor	RESC1609X50X30NL10T20	R17, R18	100 kΩ	2
26	Tlačidlo	S-PTS810SJK250SMTRLFS	S		1
27	Solder pad	SP-Solder PAD	SB1, SB2, SB3		3
28	Solder Bridge	Solder Bridge CONNECTED	SB4, SB5, SB6, SB7, SB8, SB9		6
29	Lineárny regulátor	MCP1802T-1802I/OT	U2		1
30	Quectel BC660K-GL	U-BC660	U4		1



## E Obsah elektronickej prílohy

Obsahom elektronickej prílohy sú dva adresáre. Prvý pod názvom Altium designer obsahuje súbory týkajúce sa návrhu schémy a dosky.

Druhý adresár obsahuje tri programy na testovanie navrhnutého modulu BC660K-GL.

- Prvý z programov AT.py bol použitý na testovanie prenosových rýchlostí modulu.
- Druhý z programov BC660.py slúžil ako knižnica.
- Tretím z programov BC660K-GL.py bol použitý na testovanie hraničných rádiových podmienok.

