



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

APLIKACE NB-IOT TECHNOLOGIE

APPLICATION OF NB-IOT TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Juraj Cagáň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky |
| Student: | Bc. Juraj Cagán |
| Studijní program: | Mechatronika |
| Studijní obor: | bez specializace |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2022/23 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace NB-IoT technologie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie NB-IoT představuje v současné době jeden z možných přístupů umožňujících propojení různých technologických celků v rámci chystané chytré infrastruktury moderních měst. S jejím praktickým nasazením jsou doposud omezené zkušenosti a návrh vhodného technologického demonstrátoru umožní praktické ověření vlastností a aplikovatelnosti této technologie v laboratorních podmínkách.

Cíle diplomové práce:

- seznámte se s technologií NB-IoT sítě
- proved'te rešerši srovnatelných IoT technologií s důrazem na praktickou použitelnost
- popište proces nasazení technologie v komerčním prostředí
- navrhnete technologický demonstrátor pro ověření podstatných funkcí sítě; demonstrátor musí obsahovat NB-IoT koncentrátor, cloudovou službu, vstupní senzorické uzly

Seznam doporučené literatury:

Jaeku Ryu: NB-IoT Handbook, dostupné online: http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_NB_LTE.html

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Úvodné kapitoly diplomovej práce sa zameriavajú na technológiu NB-IoT a zároveň popisujú jej alternatívy vo sfére Low-Power Wide-Area (LPWA) sietí. Rešerš dopĺňa porovnanie komerčných IoT platforiem, protokolov a bezdrôtových sietí, určených na lokálnu komunikáciu medzi senzormi a IoT zariadeniami. Nasledujúca časť definuje ciele práce a koncept spracovania danej problematiky. Na základe poznatkov z rešerše sú bližšie špecifikované časti technologického demonštrátora. Praktická časť objasňuje výber použitých mikrokontrolérov, senzorických uzlov a popisuje návrh vlastnej dosky plošných spojov. Taktiež zahŕňa opis riadiaceho algoritmu na vyššej úrovni abstrakcie. V neposlednom rade je realizovaný návrh komunikácie a zber senzorických dát využitím komerčnej cloudovej platformy a vývoj jednoduchého používateľského rozhrania. V závere sa práca zaoberá praktickým testovaním parametrov NB-IoT siete a demonštráciou aplikácie na reálnom systéme.

Abstract

The initial chapters of master's thesis focus on NB-IoT technology and its alternatives within the field of Low-Power Wide-Area (LPWA) networks. The research is further enhanced by comparing various commercial IoT platforms, protocols, and wireless networks, that are intended for local communication between sensors and IoT devices. The subsequent section defines the goals of this project and presents the approach taken towards examining the given issue. Based on the research findings, the main parts of the technological demonstrator are outlined in greater detail. The practical section elucidates the selection of appropriate microcontrollers and sensor nodes, while also covers the design of a customized printed circuit board. Additionally, it describes the control algorithm at a higher level of abstraction. The thesis includes the design of communication for collecting sensory data through a commercial cloud platform, as well as the development of a simple user interface. Finally, the thesis concludes with practical testing of NB-IoT network parameters, followed by the implementation of a demonstrative application on a real system.

Kľúčové slova

NB-IoT, LPWAN, programovací jazyk C, MQTT, BLE-mesh, ESP-IDF, ESP32-C3

Keywords

NB-IoT, LPWAN, C programming language, MQTT, BLE-mesh, ESP-IDF, ESP32-C3

Bibliografická citácia

CAGÁŇ, Juraj. *Aplikace NB-IoT technologie* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149624>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jiří Krejsa.

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu práce doc. Ing. Jiřímu Krejsovi, Ph.D. za cenné rady a inšpiratívne podnety. Spolu s doc. Ing. Stanislavom Věchetom, Ph.D. mi poskytli hardware potrebný pri tvorbe tejto práce. V neposlednom rade by som sa chcel poďakovať Ing. Pavlovi Tomíčkovi za pomoc pri návrhu mojej prvej dosky plošných spojov. Veľká vďaka patrí aj mojej rodine, kamarátom a priateľke za podporu počas celého štúdia.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu *Aplikace NB-IoT technologie* spracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Jiřího Krejsu, Ph.D., s použitím zdrojov uvedených v zozname.

Juraj Cagán

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 10 |
| 2 | REŠERŠ | 11 |
| 2.1 | Technológia NB-IoT | 11 |
| 2.1.1 | Technické požiadavky | 11 |
| 2.1.2 | Frekvenčné pásma | 12 |
| 2.1.3 | Nasadenie technológie | 13 |
| 2.1.4 | Štruktúra NB-IoT frame | 14 |
| 2.1.5 | Fyzická vrstva | 15 |
| 2.2 | LPWANs | 17 |
| 2.2.1 | NB-IoT a LTE-M | 19 |
| 2.2.2 | Sigfox | 25 |
| 2.2.3 | LoRaWAN | 29 |
| 2.2.4 | Porovnanie LPWANs | 34 |
| 2.3 | IoT platformy | 35 |
| 2.3.1 | Porovnanie IoT platforiem | 36 |
| 2.3.2 | Amazon Web Services | 37 |
| 2.4 | IoT protokoly | 40 |
| 2.4.1 | Porovnanie IoT protokolov | 40 |
| 2.4.2 | MQTT protokol | 41 |
| 2.5 | IoT mesh siete | 43 |
| 3 | DEFINÍCIA ÚLOHY | 47 |
| 3.1 | Ciele práce | 47 |
| 3.2 | Koncept spracovania úlohy | 47 |
| 4 | VLASTNÁ ŠPECIFIKÁCIA ÚLOHY | 49 |
| 4.1 | Technologický demonštrátor | 49 |
| 4.1.1 | Fotobioreaktor | 49 |
| 4.1.2 | Monitorovanie systému | 50 |
| 4.2 | Cloudová platforma a komunikačný protokol | 50 |
| 4.2.1 | Amazon Web Services | 51 |
| 4.2.2 | IoT protokol MQTT | 51 |
| 4.3 | Lokálna sieť, HW a SW komponenty | 51 |
| 4.3.1 | BLE mesh a vývojová platforma ESP | 51 |
| 4.4 | Používateľské rozhranie | 52 |
| 4.5 | Architektúra systému | 52 |
| 5 | HARDWARE | 53 |
| 5.1 | Riadiaci modul | 53 |
| 5.2 | RF modul | 54 |
| 5.3 | NB-IoT koncentrátor | 55 |
| 5.3.1 | Návrh dosky plošných spojov | 55 |
| 5.4 | Senzorické uzly | 61 |
| 5.4.1 | Senzor teploty, tlaku a vlhkosti | 61 |
| 5.4.2 | Senzor intenzity osvetlenia | 61 |
| 5.4.3 | Senzor koncentrácie CO ₂ | 62 |
| 5.4.4 | Senzor pH kvapaliny | 63 |
| 5.4.5 | Senzor zákalu | 63 |
| 5.4.6 | Senzor elektrického prúdu | 64 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6 | FIRMWARE | 65 |
| 6.1 | Vývojové prostredie | 65 |
| 6.1.1 | PlatformIO | 65 |
| 6.1.2 | ESP-IDF | 65 |
| 6.2 | NB-IoT koncentrátor | 66 |
| 6.2.1 | Obsluha RF modulu | 66 |
| 6.2.2 | BLE mesh | 67 |
| 6.2.3 | Zber senzorických dát a komunikácia s cloudom | 68 |
| 6.3 | Senzorické uzly | 69 |
| 6.3.1 | BLE mesh | 70 |
| 6.3.2 | Meranie teploty, tlaku a vlhkosti | 70 |
| 6.3.3 | Meranie intenzity svetla | 71 |
| 6.3.4 | Meranie koncentrácie CO ₂ | 71 |
| 6.3.5 | Meranie pH | 71 |
| 6.3.6 | Meranie zákalu | 71 |
| 6.3.7 | Meranie elektrického prúdu | 71 |
| 7 | TESTOVANIE A INTEGRÁCIA ČASTÍ SYSTÉMU | 72 |
| 7.1 | Parametre NB-IoT technológie a navrhnutého riešenia | 72 |
| 7.1.1 | Data rate | 72 |
| 7.1.2 | Overhead a throughput | 75 |
| 7.2 | Integrácia s cloudovou platformou | 79 |
| 7.3 | Používateľské rozhranie | 80 |
| 7.4 | Testovacie meranie na fotobioreaktore | 81 |
| 8 | ZÁVER | 84 |
| 9 | ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV | 86 |
| 10 | ZOZNAM SKRATIEK, OBRÁZKOV A TABULIEK | 92 |
| 10.1 | Zoznam skratiek | 92 |
| 10.2 | Zoznam obrázkov | 93 |
| 10.3 | Zoznam tabuliek | 94 |
| 11 | ZOZNAM PRÍLOH | 95 |
| 11.1 | Prílohy v práci | 95 |
| 11.2 | Externé prílohy | 95 |
| | PRÍLOHY | 96 |

1 Úvod

Internet vecí (IoT) priniesol v posledných rokoch celý rad nových technológií, ktoré od svojho vzniku sľubovali revolúciu v spôsobe akým žijeme, pracujeme a komunikujeme so svetom okolo nás. V počiatkovej fáze bol o nové možnosti spojené s internetom vecí enormný záujem, ale trh IoT riešení postupom času vytriezvel, stabilizoval sa a počiatkové nadšenie upadlo. Mnohé nápady sa z finančného hľadiska neukázali ako životaschopné, čo všeobecne prinútilo spoločnosti v tomto odvetví postupovať cielenejším spôsobom.

Viacere vyvinuté technológie sa však vyprofilovali ako veľmi sľubné, pretože priniesli spektrum nových riešení a možností. Uplatnenie našli v inteligentných mestách, preprave tovaru, logistike, ale aj v menej digitalizovaných odvetviach ako napríklad poľnohospodárstve, pričom rôzne príležitosti ich využitia zostali dodnes nepreskúmané.

Medzi novými technológiami bol predstavený štandard rádiových siete NB-IoT (Narrow Band - IoT). Služba, ktorú NB-IoT poskytuje, na prvý pohľad pripomína dátový balík v mobilných telefónoch, pretože umožňuje senzorum pripojiť sa bezdrôtovo k internetu aj na miestach bez pokrytia Wi-Fi signálom. Na rozdiel od smartfónov sa však táto technológia snaží splniť potreby rôznych IoT zariadení, ku ktorým je potrebné dostať signál aj v prípade, že sú umiestnené ďaleko v horách, lesoch alebo pod zemou.

Na vývoj v oblasti komunikačných IoT technológií rýchlo zareagovali veľkí hráči na trhu cloudovej infraštruktúry. Firmy ako Amazon, Microsoft alebo Google zacítili príležitosť rozšíriť svoje portfólio softwarových služieb o nové platformy, ktoré mali urýchliť proces nasadenia IoT riešení.

Široká ponuka možností však do istej miery komplikuje situáciu v oblasti vývoja IoT produktov. Na trhu je niekoľko konkurenčných komunikačných technológií, štandardov, vývojových platforiem, cloudových služieb a takisto výrobcov rádiových modulov. Každý z týchto aspektov IoT ponúka na výber mnoho možností a zorientovať sa v nich nie je jednoduché. Ich komplexný prehľad poskytuje rešeršná časť diplomovej práce, v ktorej sú načrtnuté dostupné varianty a uľahčuje vývoj požadovanej aplikácie.

Praktická časť diplomovej práce sa zameriava na návrh technologického demonštrátora, ktorý umožní otestovať vlastnosti a aplikovateľnosť NB-IoT technológie. Demonštrátor predstavuje laboratórny fotobioreaktor, ktorý sa z hľadiska obsluhy nezaobíde bez kombinácie viacerých softwarových nástrojov a komunikačných protokolov. Okrem toho je potrebné vybrať hardwarové komponenty, ako napríklad rádiový modul, mikrokontroléry, senzory na meranie požadovaných veličín a následne navrhnúť ich riadiaci firmware. V texte sa nachádza viacero vlastných schém a diagramov, ktoré sa snažia vizuálne znázorniť časti riešenia a pomôcť tak čitateľovi dotvoriť si obraz o danej problematike. Použitie cloudovej IoT platformy umožňuje nasadenie navrhnutého riešenia v komerčnom prostredí, jednoduché ukladanie meraných dát a vyhodnotenie správnej funkčnosti celého systému.

Využitím poznatkov nadobudnutých v rešerši a následným spojením dostupných technológií vzniká komplexná IoT aplikácia, ktorá využíva bezdrôtovú komunikáciu medzi sensorickými uzlami a koncentrátorom, umožňuje výmenu informácií s cloudom pomocou siete NB-IoT a vizualizuje merané dáta v používateľsky prívetivom rozhraní. Implementáciou navrhnutého riešenia v reálnych podmienkach prináša diplomová práca zaujímavé poznatky, ponúka jednu z možných aplikácií technológie NB-IoT a poukazuje na jej potenciál.

2 Rešerš

2.1 Technológia NB-IoT

Široká oblasť bezdrôtovej komunikácie, ktorá nie je ovládaná priamo ľuďmi, ale je realizovaná na úrovni senzorov, aktuátorov a elektronických zariadení, sa označuje ako MTC (Machine-Type Communication). Na potreby MTC sa posledné roky vo výraznej miere snažia cieľiť technológie, ktoré sú založené na RF (rádiofrekvenčnom) prenose. A výnimkou nie je ani LTE (Long Term Evolution). [1]

Hoci v prípade LTE ide skôr o štandard, je však základom mnohých technológií postavených na najrozšírenejšej mobilnej dátovej sieti, známej ako GSM (Global System for mobile Communications).

Charakteristickou črtou komunikácie typu MTC je veľké spektrum možností jej využitia. Príkladom sú monitorovacie kamery, ktoré zbierajú a posielajú obrovské množstvo dát, pričom sú prakticky nehybné. Na opačnej strane MTC zahŕňa i zariadenia sledujúce pohyb alebo polohu, ktoré zase posielajú malé množstvo dát nízkou frekvenciou, avšak z rôznych miest, kedy dochádza k dynamickej obsluhu komunikácie, ktorá sa nemôže prerušiť.

Zároveň existujú nemalé skupiny zariadení, ktoré kladú iba minimálne nároky z pohľadu komunikácie. Príkladom môžu byť automatické merače spotreby elektriny, plynu alebo vody, či priemyselne zamerané IoT (Internet of Things) zariadenia. Výhodou je, že sú stacionárne, odosielať malé množstvo dát a navyše zriedka. Jediným problémom je počet týchto MTC zariadení, ktorý často presahuje počet bežných zariadení aj o niekoľko rádov.

Snaha obslúžiť ich pomocou existujúcich LTE technológií by viedla k preťaženiu mobilnej siete a aj z toho dôvodu sa prvá špecifikácia NB-IoT (Narrow Band - IoT) siete zamerala práve na úpravy, zohľadňujúce tento typ zariadení. Súčasne sa pozerá na problém z pohľadu spotreby energie, keďže mnohé IoT senzory sú inštalované na odľahlých, ťažšie dostupných miestach. Často sú napájané kompletne z batérií a v niektorých prípadoch životnosť celého zariadenia je daná výdržou jeho akumulátora. Optimalizácia spotreby energie je preto nevyhnutná. Ďalšou prekážkou je častokrát slabé pokrytie signálom tam, kde operujú. Snahou úprav LTE na bolo výrazne zvýšiť aj vnútorné pokrytie signálom. [2]

Cieľom tejto kapitoly nie je poskytnúť vyčerpávajúce vysvetlenie každého aspektu NB-IoT, ale namiesto toho popísať jej vznik a nadväznosť na technológie, ktoré už existovali v čase jej návrhu. A hoci kapitola opisuje detailnejšie aj niektoré technické špecifikácie, ich zahrnutím a čiastočným pochopením možno poskytnúť lepšie porozumenie princípov, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou bezdrôtových rádiofrekvenčných technológií.

2.1.1 Technické požiadavky

Dôležitou požiadavkou, ktorú kládlo konzorcium 3GPP (3rd Generation Partnership Project) na novovznikajúce rozhranie RF technológie bola možnosť nasadenia v 200 kHz pásme. Toto pásmo sa používa v GSM sieťach, čo prináša ďalšie, pre operátorov finančne výhodné, možnosti použitia licencovaného spektra. NB-IoT technológia bola preto navrhnutá so zreteľom na známu funkcionálnu LTE. Tým pádom umožňuje opätovné použitie hardwaru a tiež zdieľanie existujúcich frekvenčných spektier s inými technológiami. Zároveň je prítomná plná podpora sieťových služieb ako je autentifikácia, bezpečnosť, sledovanie, spoplatňovanie

služieb a pod. Z pohľadu inovácií je však najväčší prínos NB-IoT technológie práve v novej štruktúre fyzickej vrstvy. [3] [4]

2.1.2 Frekvenčné pásma

Množina frekvenčných pásiem, ktoré môžu byť použité pre NB-IoT, definovalo konzorcium v špecifikácii 3GPP TS 36.101 Release 13. V nej bol predstavený zoznam podporovaných pásiem: 1, 2, 3, 5, 8, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 26, 28, 66, ktoré vidno v Tab. 2.1.

Neskoršie vydania 14 a 15 pridali ešte zopár ďalších pásiem, konkrétne: 4, 11, 14, 25, 31, 70 a 71. Registrované frekvenčné pásma pre NB-IoT v Európe sú B3 (1800 MHz), B8 (900 MHz) a B20 (800 MHz). [2] [5] [6]

Nižšie spomínané výrazy uplink a downlink patria medzi základné pojmy v oblasti bezdrôtového prenosu. Uplink označuje komunikačné spojenie, kedy je signál vysielaný zo zariadenia smerom k satelitu alebo rádio stanici a na druhej strane downlink vyjadruje prípad, kedy signál vychádza z vysielacej veže smerom k zariadeniu. [7]

Tab. 2.1) Zoznam frekvenčných pásiem NB-IoT [2]

| Pásmo | Frekvenčný rozsah | |
|-------|-------------------|----------------|
| | Uplink [MHz] | Downlink [MHz] |
| B1 | 1920 – 1980 | 2110 – 2170 |
| B2 | 1850 – 1910 | 1930 – 1990 |
| B3 | 1710 – 1785 | 1805 – 1880 |
| B5 | 824 – 849 | 869 – 894 |
| B8 | 880 – 915 | 925 – 960 |
| B12 | 699 – 716 | 729 – 746 |
| B13 | 777 – 787 | 746 – 756 |
| B17 | 704 – 716 | 734 – 746 |
| B18 | 815 – 830 | 860 – 875 |
| B19 | 830 – 845 | 875 – 890 |
| B20 | 832 – 862 | 791 – 821 |
| B26 | 814 – 849 | 859 – 894 |
| B28 | 703 – 748 | 758 – 803 |
| B66 | 1710 – 1780 | 2110 – 2200 |

Pri bližšom pohľade na Tab. 2.1 si možno všimnúť, že NB-IoT používa prevažne nižšie frekvencie. Opäť sa tým zohľadňuje predpoklad, že mnoho MTC zariadení operuje v náročných podmienkach z hľadiska RF komunikácie. Dôvodom je, že všeobecne nižšie frekvencie, nielen v rámci LTE pásiem ľahšie prestupujú prekážkami, menej sa utlmia a sú vystavené menšiemu rušeniu, čo ďalej zlepšuje robustnosť a spoľahlivosť komunikácie. [2]

2.1.3 Nasadenie technológie

Ako naznačuje samotný názov „Narrow Band“, technológia si vystačí s úzkou šírkou frekvenčného pásma, vďaka čomu môže efektívne používať malé časti prispôbeného spektra napríklad z GSM ale aj v rámci existujúcich pásiem LTE. Výsledkom potreby nasadenia v 200 kHz pásme bolo, že jedna nosná frekvencia NB-IoT okupuje frekvenčný rozsah 180 kHz v uplink a 180 kHz v downlink. 180 kHz je šírka práve 1 PRB (Physical Resource Block) v LTE. Tieto vlastnosti umožňujú NB-IoT, aby bola nasadená v 3 rôznych prevádzkových režimoch, ktoré vidno na obrázku Obr. 2.1. [4]

Standalone

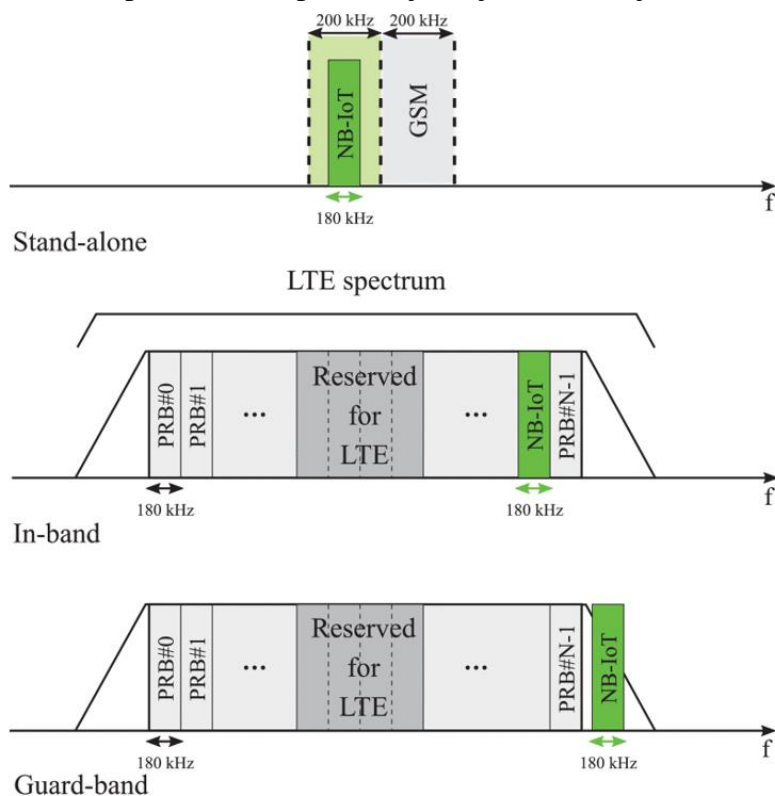
V „standalone“ režime je NB-IoT nasadená na jednej alebo viacerých existujúcich a upravených GSM nosných s frekvenčným rozsahom 200 kHz. Výhodou tohto režimu je efektívne využitie GSM pásma na IoT aplikácie a tiež, že NB-IoT môže využiť všetok prenosový výkon vysielacej stanice, BS (Base Station). [4]

In-band

V „in-band“ režime je NB-IoT nasadená v rámci iných LTE nosných a využíva rovnaké PRB ako LTE, teda s rozsahom 180 kHz. Z toho dôvodu sú tu však isté obmedzenia, napríklad z hľadiska časovania, aby nedošlo ku kolízii s LTE, ktorá nesmie byť narušená. Prenosový výkon sa delí medzi LTE a NB-IoT. [4]

Guard-band

V treťom, „guard-band“, režime sa využívajú nepoužitú RB v rámci ochranného pásma nosných frekvencií LTE a výkon BS je opäť zdieľaný. Toto umožňuje využiť ochranné pásma 2 susediacich LTE pásiem, čo teoreticky predstavuje maximálnu šírku $(100 + 100) \text{ kHz} = 200 \text{ kHz}$. V porovnaní s „in-band“ operáciou sa predpokladá menšie rušenie v prípade, že NB-IoT je nasadená v ochrannom pásme, ktoré patrí iba jednej LTE nosnej. [4] [8]

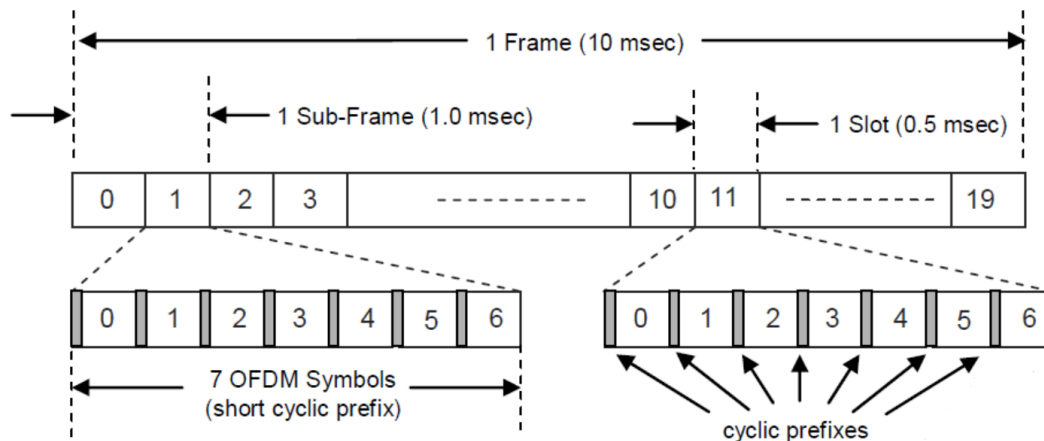


Obr. 2.1) Prevádzkové režimy NB-IoT [9]

2.1.4 Štruktúra NB-IoT frame

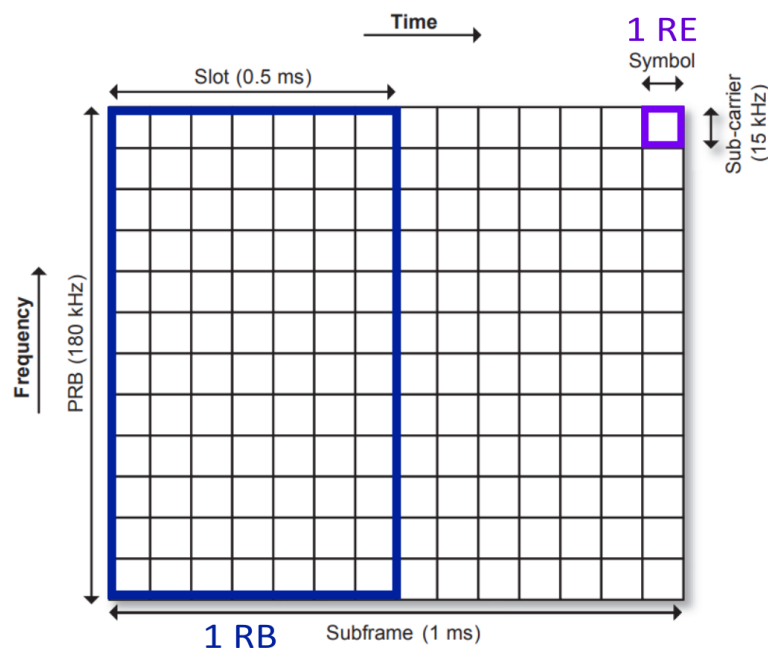
Prenosová schéma v downlink je založená na metóde OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), s rozstupom subnosných 15 kHz, opäť ako v LTE. Štruktúra 1 frame je zobrazená na obrázku Obr. 2.2 a v časovej doméne má nasledujúce vlastnosti [10]:

- Dĺžka 1 RF frame je 10 ms. To znamená 100 frames za 1 sekundu.
- 1 frame má 10 subframes.
- 1 subframe má 2 sloty.
- 1 slot má 7 OFDM symbolov, kde každý symbol tvorí tzv. cyklický prefix a reálna hodnota symbolu.



Obr. 2.2) Štruktúra jedného NB-IoT frame [10]

Vo frekvenčnej doméne využíva NB-IoT jeden LTE PRB, ktorý pozostáva z 12 subnosných, každá s odstupom 15 kHz, čo tvorí celkovo, už spomínaných, 180 kHz. Ako vidno na obrázku Obr. 2.3, jeden PRB si možno predstaviť ako 2-dimenzionálny prvok, ktorý sa vo frekvenčnej doméne skladá z 12 subnosných a v časovej doméne z 1 slotu. Ten možno rozdeliť ešte na menšie prvky, REs (Resource Elements), kde 1 RE predstavuje vo frekvenčnej doméne 1 subnosnú a v časovej doméne 1 OFDM symbol.



Obr. 2.3) Physical Resource Block [11]

To, že NB-IoT kanálom stačí práve jeden LTE PRB zaisťuje, že NB-IoT možno prevádzkovať spolu s LTE a keď je nasadená v rámci LTE operátora, NB-IoT PRB si zachováva ortogonalitu so všetkými ostatnými LTE PRB. Pomáha sa tým predchádzať rušeniu a zaisťuje sa spoľahlivá komunikácia medzi zariadením a sieťou. [12]

Uplink NB-IoT má šírku pásma 200 kHz, s prenosovou šírkou 180 kHz a ochranným pásmom 10 kHz na oboch stranách. Použitá prenosová schéma je SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access), so 7 symbolmi v každom slot. Rozstup subnosných môže byť buď 15 kHz a potom existuje 12 subnosných na jeden SC-FDMA symbol, alebo 3,75 kHz pre 48 subnosných na jeden SC-FDMA symbol.

2.1.5 Fyzická vrstva

NB-IoT zdedila z LTE väčšinu svojich funkcií, ako aj základné signály a kanály, hoci ich celkový počet sa znížil. Ich zložitosť sa znížila tiež, aby sa reflektovali nízkonákladové a nízkoenergetické obmedzenia NB-IoT modulov UE (User Equipment). Aj počet kanálov a signálov sa znížil a prispôsobili sa novej štruktúre NB-IoT frame. [9, s. 1]

Kľúčovým komponentom v systéme bezdrôtovej komunikácie LTE je eNB (evolved Node B). Označuje vysielač stanicu, ktorá bezdrôtovo komunikuje so zariadeniami, UE v sieti. Uzol eNB umožňuje pripojenie UE do siete a je zodpovedný za plánovanie zdrojových blokov, časovanie a riadenie prenosu dát ku koncovým zariadeniam. Riadi tiež odovzdávanie UE medzi rôznymi eNB, keď sa UE pohybuje po sieti.

Downlink

Downlink NB-IoT obsahuje 2 fyzické signály [9, s. 7]:

- NPSS a NSSS – Narrowband Primary a Secondary Synchronization Signals
- NRS – Narrowband Reference Signal

a 3 fyzické kanály:

- NPBCH – Narrowband Physical Broadcast Channel
- NPDCCH – Narrowband Physical Downlink Control Channel
- NPDSCH – Narrowband Physical Downlink Shared Channel

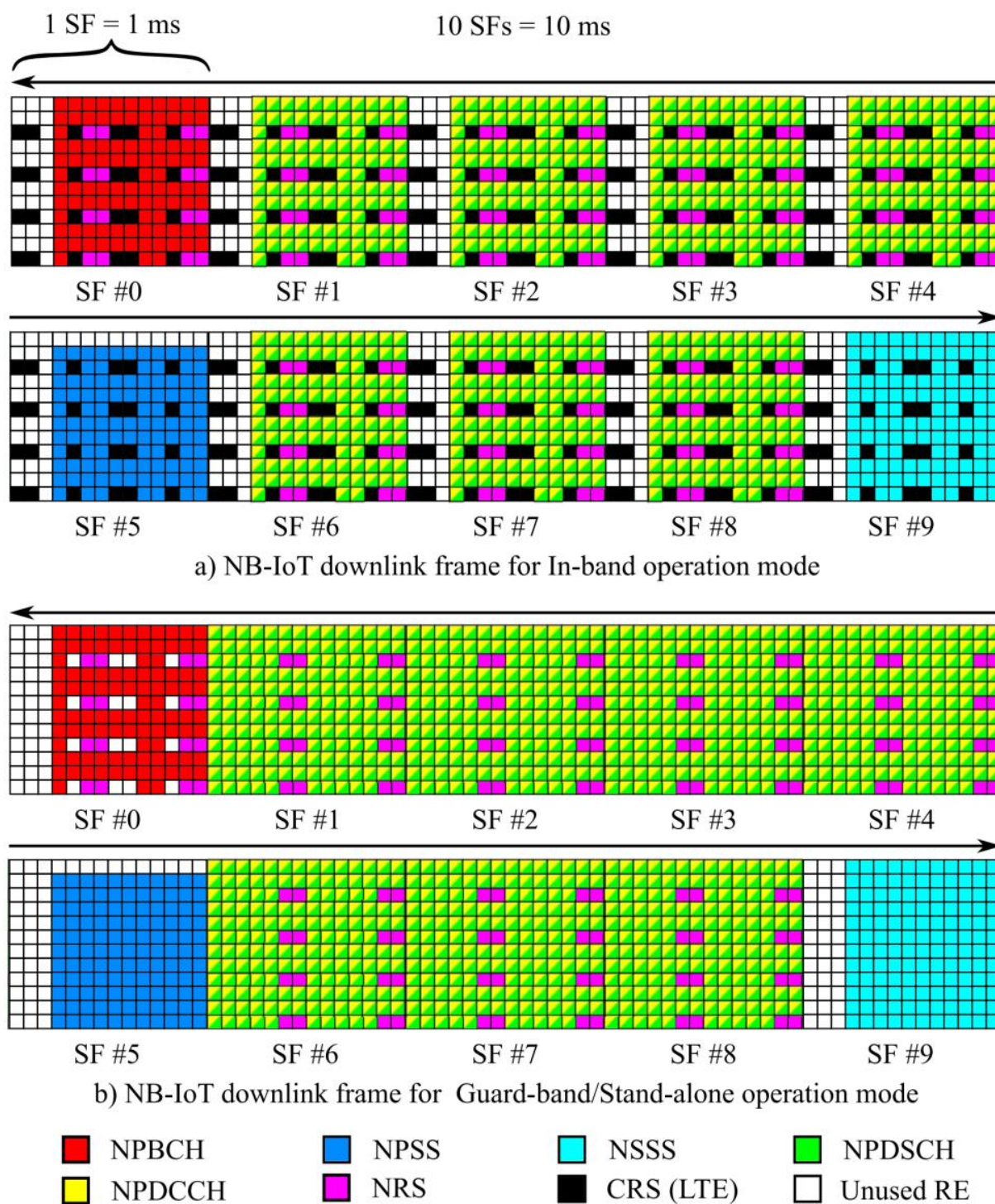
NPSS a NSSS – NPSS je základný signál vysielač eNB. Založený je na Zadoff-Chu sekvencii, ktorá má požadované korelačné vlastnosti. Tento signál používa UE na časovú a frekvenčnú synchronizáciu. Inými slovami, umožňuje UE nájsť začiatok frame NB-IoT a eliminovať prípadný frekvenčný posun aj v prípade, že je zariadenie vybavené lacným oscilátorom. Fyzický signál NSSS nesie informáciu o identite (ID) bunky a obsadzuje posledný subframe každého párneho frame, zatiaľ čo NPSS je pridelený vždy 5. subframe ako vidno na Obr. 2.4. [9, s. 7-8]

NRS – Referenčný signál NRS, tiež nazývaný „pilot“, sa vždy nachádza vo všetkých subframes okrem tých, ktoré sú vyhradené pre NPSS a NSSS. NRS zohráva kľúčovú úlohu pri zabezpečovaní spoľahlivej komunikácie, keďže referenčný signál určuje polohu kanálov vo frekvenčnej doméne. UE ho potrebuje na demoduláciu a dekódovanie prijatých dát. [9, s. 8]

NPBCH – Prvý fyzický signál, ktorý NB-IoT zariadenie dekóduje je NPBCH. Zakaždým mu je pridelený nultý subframe daného frame a nesie MIB-NB (Master Information Block) a SIB-NB (System Information Block). Tie obsahujú potrebné informácie požadované modulmi UE na získanie základných systémových informácií ako napríklad mód nasadenia (stand alone, in-band, guard-band), šírku pásma, atď. [9, s. 9]

NPDCCH – Na prípravu prenosu dát je rovnako ako v LTE potrebný kontrolný kanál. V NB-IoT je kanál NPDCCH vyhradený na prenos riadiacich informácií zo siete smerom k UE. Riadiace informácie môžu zahŕňať časové plánovanie downlink zdrojov, potvrdenie príjmu dát, pridelenie uplink zdroja a pod. NPDCCH môže mať pridelený hociktorý prístupný subframe okrem tých, ktoré sú určené pre NPSS, NSSS a NPBCH. [9, s. 10]

NPDSCH – NPDSCH je fyzický kanál, ktorý je zodpovedný za samotný prenos používateľských dát a prenos systémových informačných blokov. Mapovanie tohto kanálu má tie isté pravidlá ako kanál NPDCCH ako vidno na nasledujúcom obrázku. [9, s. 10]



Obr. 2.4) NB-IoT downlink frame pre jednotlivé režimy nasadenia [9, s. 7]

Obr. 2.4 vizualizuje NB-IoT downlink frame a jednotlivé jeho časti. Pomyselná vertikálna os predstavuje frekvenciu a skladá sa z 12 subnosných šírky 15 kHz. Na horizontálnej osi je čas, kde 1 celý frame predstavuje 10 ms. Na prvý pohľad sa frame v režime nasadenia in-band (časť Obr. 2.4a) líši od frame pri nasadení v režimoch guard-band alebo stand-alone (časť Obr. 2.4.b) v tom, že prvé 3 OFDM symboly každého subframe sú vynechané. Dôvodom je nevyhnutnosť zachovať tieto symboly bez rušenia, pretože ich využíva Control Channel LTE. Ďalší rozdiel je v signáli CRS (Cell-Specific Reference Signal), ktorý je prítomný iba v in-band režime, nakoľko NB-IoT frame sa nachádza v cudzom frekvenčnom pásme LTE. Referenčný signál LTE CRS je kritický, pretože slúži na demoduláciu prenášaných dát a obsadenie týchto pozícií by malo za následok negatívny vplyv na kvalitu LTE signálu. [9, s. 7]

Navyše pohľad na NB-IoT frame poskytuje možnosť uvedomiť si, že oba, fyzický kanál aj fyzický signál okupujú rovnaké zdroje a to práve 1 subframe. Fyzický kanál je časovo-frekvenčný „zdroj“, ktorý sa používa na prenos kontrolných údajov a používateľských dát. Na druhej strane fyzický signál sa môže prenášať vo fyzickom kanáli, ale plní iba jednu špecifickú funkciu ako napríklad synchronizáciu, alebo demoduláciu.

Uplink

Uplink NB-IoT je tvorený 1 fyzickým signálom: [9, s. 10]

- DMRS – Demodulation Reference Signal

a 2 fyzickými kanálmi:

- NPRACH – Narrowband Physical Random Access Channel
- NPUSCH – Narrowband Physical Uplink Shared Channel

DMRS – Referenčný signál DMRS, „uplinkový pilot“, má za úlohu, analogicky ako NRS v downlink, zabezpečiť frekvenčnú synchronizáciu prenosu. [9, s. 13-14]

NPRACH – NPRACH je fyzický uplink kanál, ktorý je vyhradený na prenos prvého signálu z mobilného zariadenia smerom k eNB s cieľom požiadať o prístup do siete. Rozstup subnosných, ktorý sa používa pre NPRACH, je 3,75 kHz, čo umožňuje použiť na prenos až 48 možných subnosných v pásme širokom 180 kHz. [9, s. 11]

NPUSCH – Posledný fyzický kanál je NPUSCH, ktorý má opäť analogickú funkciu ako NPDSCH v downlink. [9, s. 13]

Dôvod prečo sa tieto kanály nazývajú zdieľané je ten, že niekoľko UE ich môže využívať súčasne. Zároveň sú schopné zdieľať rovnaké fyzické zdrojové bloky PRB vo frekvenčnej doméne s inými kanálmi ako NPDCCH. Ale v časovej doméne pracujú na rozdielnych subframes, čím sa eliminuje ich vzájomná interferencia.

2.2 LPWANs

NB-IoT patrí do skupiny konkurenčných telekomunikačných technológií, ktorá sa všeobecne nazýva LPWANs (Low-Power Wide-Area Networks). Ide o siete určené na bezdrôtové pripojenie IoT zariadení k internetu, a to ako v priemyselnej oblasti, tak v spotrebnom sektore. Spoločným cieľom, ktorý LPWAN technológie zdieľajú, je optimalizácia faktorov kritických pre IoT [13]:

Prenos na dlhú vzdialenosť – LPWA siete sa často používajú na pokrytie zariadení v ťažko dostupných miestach. Niektoré technológie sú zamerané viac na vzdialenosť a iné na

podzemné objekty. Prenos na tak veľké vzdialenosti (bežne desiatky km) je zaistený tým, že majú k dispozícii veľký link budget, čo je termín popisujúci celkový výkon prenášaného signálu od vysielača k prijímaču. Vďaka tomu má prenášaný signál dostatok energie na to, aby ho mohol prijímač detekovať, napriek rozličným stratám pozdĺž komunikačného kanálu. Navyše LPWAN technológie modulujú signál nižšou rýchlosťou a zároveň využívajú prijímače s vysokou citlivosťou, niekedy až -130 dBm^1 , čo je v porovnaní s -90 až -110 dBm , ktoré používajú tradičné bezdrôtové technológie navýšenie 100 až 10000 krát. [14]

Energetická účinnosť – LPWAN technológie sú navrhnuté tak, že umožňujú predĺžiť životnosť batérie zariadenia až na desať rokov. Hoci prístupy k minimalizácii spotreby energie sa líšia, primárny spôsob zvýšenia energetickej účinnosti spočíva v odpojení zariadenia, keď dáta neprijíma ani neodosiela.

Dôležitým pojmom z hľadiska energetickej účinnosti je „paging“, ktorý sa spomína aj neskôr v tejto kapitole. V kontexte IoT ide o proces, pri ktorom sieť hľadá konkrétne IoT zariadenie vysielať „paging“ správy, čím sieť hovorí UE „niečo pre teba mám“. Vo väčšine prípadov „paging“ nastáva, keď je zariadenie v nečinnom režime. To znamená, že UE musí sledovať, či mu sieť posiela nejakú správu a musí minúť určitú energiu v rámci monitorovacieho procesu.

Bezpečnosť – keďže digitálna bezpečnosť sa dostávala čoraz viac do popredia, LPWAN technológie implementovali existujúce bezpečnostné funkcie mobilných sietí, vrátane autentifikácie, identifikácie zariadení, či enkryptovania a značným spôsobom boli schopné vďaka nim profitovať. [13]

Pokiaľ však ide o IoT aplikácie, LPWAN technológie nie sú jediná dostupná možnosť. Na výber je viacero komunikačných technológií a protokolov vrátane Bluetooth, Zigbee, Z-Wave aj WiFi. Každá technológia má svoje výhody a nevýhody, ktoré treba brať do úvahy. WiFi a Zigbee sú dobre známe a často používané na vnútornú komunikáciu, či smart home riešenia a konkrétne Bluetooth je použitý v rámci lokálnej komunikácie aj v tejto práci. Ich spotreba energie a prenosová vzdialenosť sú však pre mnohé aplikácie nevyhovujúce.

Na základe toho, v akom frekvenčnom spektre LPWA siete operujú, sa rozdeľujú na 2 skupiny:

Licencované LPWANs – Používanie licencovaných frekvenčných pásiem prináša niekoľko výhod. Zákazníci sa môžu spoľahnúť na stabilné pripojenie bez výraznejšieho rizika rušenia, pretože ich zariadenia operujú na konkrétnych, predom stanovených frekvenčných kanáloch. Po druhé, licencované LPWAN spravujú stovky telekomunikačných operátorov, ktorí poskytujú podporu, prevádzku a zabezpečujú interoperabilitu medzi rôznymi sieťami. A po tretie, použitie licencovaných frekvenčných pásiem je nevyhnutné v prípade LPWA aplikácií, ktoré vyžadujú vysokorýchlostné dátové pripojenie. Vyššia data rate (prenos daného množstva dát za jednotku času) im poskytujú výkonnejšie vysielače, sofistikovanejšie modulačné schémy a hlavne prístup k väčšiemu množstvu kanálov frekvenčného spektra. Licencované pásma však prinášajú aj svoje nevýhody. Jednou z hlavných sú náklady spojené s licencovaním, ktoré sú pomerne vysoké, najmä pre menšie spoločnosti. Ďalším protiargumentom je, že licencované frekvencie sú obmedzené na určité regióny, čo môže predstavovať výzvy pre spoločnosti, ktoré chcú expandovať na zahraničný trh, pretože proces nadobudnutia licenčných práv je komplikovaný a časovo náročný. [15]

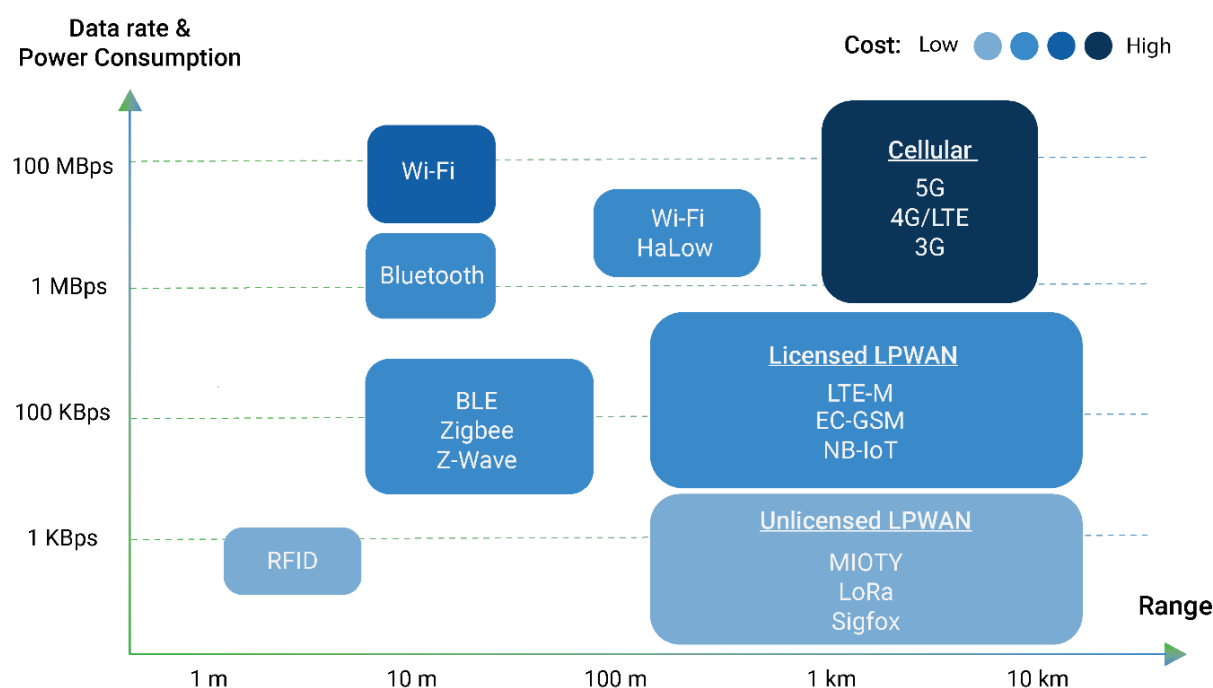
¹ Jednotka výkonu dBm (decibel-milliwatts) $P_W = 10^{\frac{P_{dBm}-30}{10}} [mW]$

Medzi licencované LPWANs patria napríklad LTE-M (Long Term Evolution - for Machines) a NB-IoT.

Nelicencované LPWANs – S nelicencovanými LPWAN technológiami sú spojené nižšie finančné náklady. Ďalšou výhodou je jednoduchosť implementácie, avšak aj v nelicencovanom pásme musia používatelia dodržiavať súbory pravidiel, aby zabezpečili, že na zdieľaných frekvenciách bude spoločne fungovať veľa zariadení. Pre širokopásmovú komunikáciu sa primárne používa nelicencované spektrum vo frekvenčnom pásme 900 MHz (868 MHz v Európe a 915 MHz v USA) a 2,4 GHz. [16]

Medzi najznámejšie nelicencované LPWANs patria napríklad Sigfox, LoRaWAN alebo RPMA.

Graf na obrázku Obr. 2.5 poskytuje stručne zhrnuté informácie o tom, ktorá bezdrôtová technológia je vhodná na aký typ aplikácie. Graf zobrazuje data rate, ktorý priamo úmerne súvisí s energetickou náročnosť danej technológie, v závislosti na prenosovej vzdialenosti. Pre prvotnú predstavu, sú v ňom farebne odlíšené aj cenové kategórie, v akých sa jednotlivé technológie pohybujú.



Obr. 2.5) Porovnanie bezdrôtových komunikačných technológií [17]

Zvyšná časť tejto kapitoly sa nebude sústreďovať iba na technické parametre LPWA sietí. Jej cieľom je poskytnúť aj informácie o ich dostupnosti a venovať sa praktickým aspektom nasadenia ako je energetická náročnosť, pokrytie signálom a cena v kontexte nášho regiónu. Zároveň poukázať na silné a slabé stránky LPWA sietí, ktoré sú v Česku reálne použiteľné a pokúsiť sa ich navzájom porovnať.

2.2.1 NB-IoT a LTE-M

NB-IoT a LTE-M patria do skupiny so spoločným označením CIoT (Cellular IoT) sietí, pretože využívajú licencované mobilné RF pásma a sú navrhnuté tak, aby mohli byť integrované v existujúcej „cellular“ infraštruktúre.

NB-IoT

NB-IoT je spoločné označenie viacerých štandardov, ktoré sa v niektorých prípadoch voľne zamieňajú. Dokument 3GPP Release 13 definoval základy štandardu LTE Cat-NB1 a približne o rok neskôr bola predstavená nová kategória zariadení LTE Cat-NB2 v 3GPP Release 14.

Pokrytie – Spoločným znakom licencovaných LPWA sietí je snaha o tzv. CE (Coverage Enhancement), teda väčšie pokrytie signálom než v prípade existujúcich mobilných sietí. Vďaka tomu, že mnohé IoT aplikácie nekladú vysoké nároky na prenosové rýchlosti a latenciu², dosahuje NB-IoT lepšieho pokrytia metódou opakovania správ. Opakovanie správ doslova znamená, že rovnaká správa sa odošle niekoľko krát, čo zvyšuje pravdepodobnosť, že aspoň jedna kópia bude správne doručená na strane prijímača aj v prípade, že zvyšné kópie sa stratili v dôsledku rušenia alebo iného problému v komunikačnom kanáli. [18, s. 221]

Pokrytie a schopnosť konektivity NB-IoT zariadení v skutočných podmienkach testovali napríklad výskumníci na univerzite v Estónsku. V rámci svojich meraní nasadili 20 zariadení s NB-IoT modulom a sledovali parameter RSSI³ a výkon signálu na strane zariadenia. Z ich výsledkov, ktoré publikovali v [19] vyplýva, že modul Quectel BG96 bol schopný zabezpečiť konektivitu až do intenzity signálu -105 dBm, čo je v porovnaní s -95 dBm pri LTE desaťnásobne slabší signál.

Energetická náročnosť – IoT zariadenia zvyčajne odosiľajú krátke správy a aj to iba sporadicky. A aj keď v týchto okamihoch je ich energetická spotreba výrazne vyššia ako v nečinnom stave, vo výsledku je životnosť ich batérií je ovplyvnená najmä tým, ako efektívne sú v stave medzi dátovým prenosom.

Šetrenie energie možno dosiahnuť predĺžením „paging“ periódy a v extrémnych prípadoch tým, že „paging“ nebude požadovaný vôbec. Konkrétnym riešením tohto problému sa zaoberajú dokumenty 3GPP Release 12 a 13, v ktorých konzorcium predstavilo dva pojmy eDRX (extended Discontinuous Reception) a PSM (Power-Saving Mode) optimalizujúce spotrebu zariadenia v „idle“ režime.

Počas PSM je vysielateľ zariadenia úplne vypnutý, UE sa neohlasuje sieti (Obr. 2.6 horná časť). Beží iba jeho základný oscilátor na udržanie časovej referencie, aby UE vedelo, kedy sa prebudiť. Časový interval, počas ktorého je zariadenie v móde PSM nedostupné, určuje TAU (Tracking Area Update) časovač s maximálnou nastaviteľnou dobou vyše 1 roku. Tento mód je vhodný hlavne pre prípady využitia senzorov alebo časovačov, kedy prenos iniciuje samotné zariadenie, pretože odosiela dáta na server (uplink).

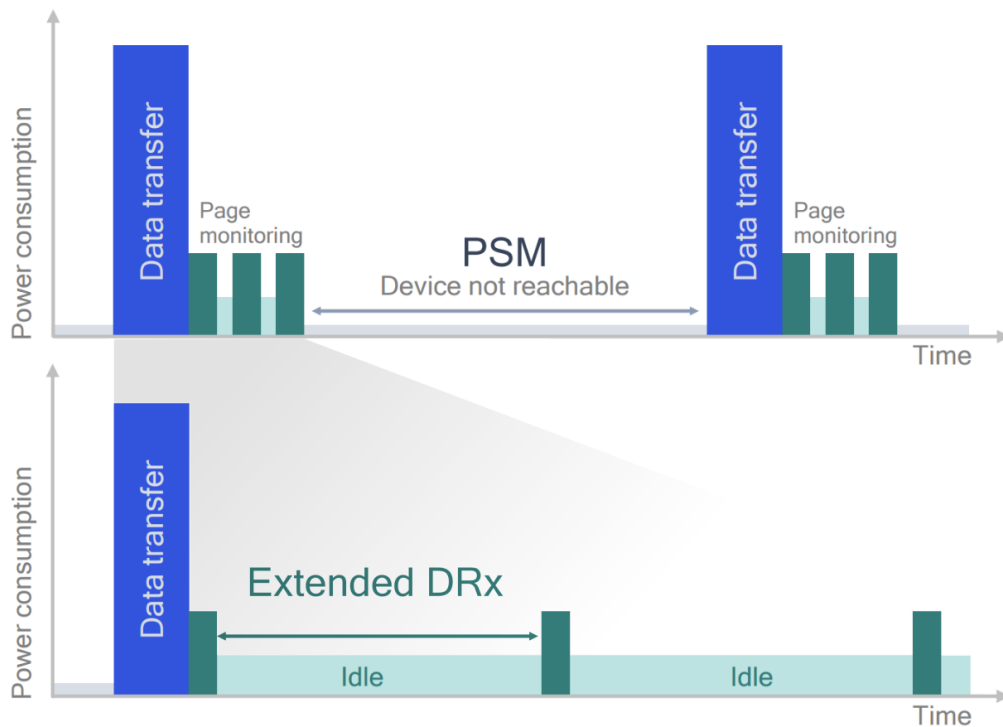
Pri eDRX je rozdiel v tom, že zariadenie je z pohľadu siete stále dostupné. UE naďalej kontroluje príjem dát pravidelne s kratšou periódou, ktorá sa konfiguruje pomocou DRX cyklu na maximum necelých 180 minút (Obr. 2.6 spodná časť). Aplikácie využívajúce prevažne eDRX sú tie, pri ktorých server posiela dáta smerom k UE (downlink).

Dôležité však je, že v oboch prípadoch zariadenie aj sieť udržiavajú kontext daného pripojenia, vďaka čomu nie je potrebná inicializačná procedúra pri každom znovupripojení. Tým sa optimalizuje signalizácia a spotreba energie pri prechode z nečinného do pripojeného režimu. [18, s. 221]

Tieto techniky a mechanizmy hrajú rozhodujúcu rolu pri maximalizácii výdrže batérie, keďže väčšina zariadení IoT strávi prevažnú časť svojej životnosti v nečinnom stave.

² Latencia v telekomunikácii predstavuje časový interval medzi vyslaním a príjmom signálu. V mobilných sieťach sa latencia pohybuje v stovkách ms, zatiaľ čo pri pevných IP sieťach v jednotkách ms.

³ Received Signal Strength Indicator vyjadruje kvalitu prijímaného signálu na strane prijímačieho zariadenia. Na rozdiel od jednotky dBm ide o relatívny index, ktorý nemá fyzikálny rozmer.



Obr. 2.6) Spotreba energie s využitím mechanizmov PSM a eDRX v NB-IoT [20]

Komplexnosť zariadení – Komplexnosť a cena bezdrôtových komunikačných modulov, ktoré podporujú NB-IoT je najmä ovplyvnená faktorom „baseband processing“, pamäťovou náročnosťou a špecifickými požiadavkami na RF spektrum.

Pojem „baseband processing“ označuje spracovanie digitálneho signálu, keď modem kóduje a dekoduje signály z bezdrôtovej siete. NB-IoT bola navrhnutá tak, aby umožňovala použitie jednoduchých a lacných prijímačov, ktoré príjmom signálov NPSS a NSSS (kap. 2.1.5) zaistia časovú a frekvenčnú synchronizáciu so sieťou. Z pohľadu zariadenia stačí vzorkovacia frekvencia 240 kHz a vďaka vlastnostiam synchronizačnej sekvencie sú aj nároky na objem pamäte relatívne nízke.

Čo sa týka RF spektra, všetky požiadavky NB-IoT je možné splniť použitím jednej antény, ktorá zabezpečuje vysielačiu a prijímaciu funkciu zároveň. Tolerovaná nepresnosť oscilátora je 20 ppm⁴.

Maximálny vysielač výkon zariadenia je 20 alebo 23 dBm v závislosti od kvality signálu. Takéto relatívne nízke výkony umožňujú integráciu zosilňovača PA (Power Amplifier) priamo na čip a redukovať tak náklady na výrobu NB-IoT zariadení. [18, s. 220]

LTE-M

V dokumente 3GPP Release 13, publikovanom v roku 2016, bol okrem NB-IoT definovaný aj prvý štandard pre technológiu LTE-M s oficiálnym označením LTE Cat-M1. Špecifikácia bola tiež v 3GPP Release 14 upravená pod názvom LTE Cat-M2, ale keďže zatiaľ iba malá časť infraštruktúry podporuje Cat-M2, práca odkazuje pri LTE-M na jej prvú špecifikáciu.

Je zrejmé, že obe technológie, LTE-M aj NB-IoT, vznikali paralelne. A hoci zdieľajú veľa spoločných prvkov, vrátane mnohých technických parametrov alebo fyzickej infraštruktúry, majú unikátne vlastnosti, ktorými sa líšia. Súčasne neustále pokračuje ich vývoj,

⁴ Jednotka ppm (parts per million) vyjadruje relatívnu odchýlku o 1 milióntinu. 20 ppm v kontexte oscilátora predstavuje odchýlku výstupnej frekvencie o 0,002%.

a aj preto je dôležité rozumieť týmto rozdielom a brať ich do úvahy pri výbere komunikačnej technológie pre konkrétnu IoT aplikáciu.

Nasadenie technológie – Podobne ako NB-IoT aj LTE-M môže byť nasadená v standalone režime alebo v rámci existujúceho spektra LTE. Rozdiel je, že kým NB-IoT využíva iba 180 kHz pásmo, LTE-M je schopná operovať na 6-krát väčšej šírke frekvenčného pásma 1,08 MHz a využiť až 1,4 MHz v standalone režime. To poskytuje vyššie prenosové rýchlosti a nižšiu latenciu. [18, s. 213]

Pokrytie – LTE-M na zlepšenie dosahu využíva tiež metódu opakovania správ za cenu zníženia prenosovej rýchlosti. Sieť poskytuje dva rôzne CE módy: CE mód A podporujúci 32 opakovaní odoslania správy, a CE mód B podporujúci až 2048 opakovaní. Z pohľadu prevádzkovateľov siete sa nejedná o komplikované zmeny, stačí úprava počtu opakovaní v dátových a riadiacich kanáloch bez potreby dodatočných úprav HW siete.

CE mód A je v rámci siete vždy k dispozícii a slúži predovšetkým na vonkajšie pokrytie. Využíva sa pri tom modulácia QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) alebo 16QAM (16 bit Quadrature Amplitude Modulation) namapovaná na 1 až 6 PRB blokov.

Navyše mód B nie je povinný, iba odporúčaný. Nevyhnutný je však v prípadoch vnútorného pokrytia ťažko dostupných miest. Tento mód využíva jednoduchšiu moduláciu QPSK a pri downlink vždy zaberá väčšiu šírku, 4 alebo 6 PRBs. To má pochopiteľne vplyv na výdrž batérie prístroja, ktorá klesá, pretože spotreba v CE móde B narastá. [18, s. 163]

Rozdiely NB-IoT a LTE-M

Mobilita – Do istej miery podporujú mobilitu koncových zariadení NB-IoT aj LTE-M. Je tu však fundamentálny rozdiel v tom, akým spôsobom k tomu pristupujú.

NB-IoT prešla niekoľkými zmenami špecifikácií vo verziách 3GPP Release 13 a 14. Vo vydaní 13 boli zavedené základné možnosti mobility, ktoré umožňujú znovupripojenie ale iba v prípade, že výpadok rádiového spojenia nastal, keď bolo zariadenie v „idle“ režime. Toto obmedzenie výrazne limitovalo efektivitu NB-IoT zariadení v rušivom RF prostredí. Až vydanie 14 zlepšilo mobilitu NB-IoT pridaním možnosti opätovného pripojenia strateného rádiového spojenia, aj keď je zariadenie v aktívnom, „connected“ režime. Výsledkom je, že NB-IoT môže teoreticky udržiavať zariadenia pripojené aj počas pohybu, ale stále neumožňuje plynulý „handover“⁵ medzi vysielacími stanicami. Keď sa zariadenie vzdiali od BS, riadiaci čip jednoducho zvyšuje spotrebu energie v snahe udržať spojenie. Ak sa vzdiali od BS dostatočne ďaleko, úplne sa odpojí. Zariadenie musí nájsť inú BS, opäť podstúpiť inicializačnú sekvenciu a znova sa zaregistrovať v sieti, čím zvyšuje spotrebu energie. [21]

LTE-M plne podporuje mobilitu UE od 3GPP Release 14. Podobne ako mobilné telefóny, aj LTE-M zariadenia priebežne monitorujú kvalitu signálu v sieti a pri presune k bližšej stanici dochádza k dynamickému presmerovaniu aktuálneho spojenia. Technológia je vhodná pre aplikácie zamerané na sledovanie pohybu balíkov, lodných kontajnerov alebo vozidiel, a to až do rýchlosti pohybu koncového zariadenia 200 km/h. [18, s. 183-196]

Prenos hlasu – Z dôvodu, že LTE-M má k dispozícii šesťnásobnú šírku pásma, umožňuje rýchlosť prenosu dát až v stovkách kb/s v oboch smeroch a s nižšou latenciou, v ráde desiatok ms.

Predovšetkým vďaka takto nízkej latencii a plnej podpore mobility umožňuje LTE-M prenos hlasu cez internet. Technológia sa nazýva VoLTE (Voice over LTE), dostupná v 91 krajinách u 194 operátorov. Ďalší hlasový protokol je VoIP (Voice over Internet Protocol) a vyžaduje

⁵ Handover alebo „cell reselection“ je prenesenie aktívneho telekomunikačného spojenia (hlasového alebo dátového) medzi zariadením a BS k inej BS v rámci jednej siete. [28]

prenosové rýchlosti aspoň 12,2 kb/s v štandardnej kvalite a 23,85 kb/s v kvalite HD. Takéto možnosti prinášajú radu nových aplikácií, ktoré by s NB-IoT nešlo realizovať, ako napríklad hlasom ovládané smart home spotrebiče alebo zabezpečovacie systémy. [22]

Firmware update – V súčasnosti je LTE-M jeden z mála, ak nie jediným LPWA štandardom, ktorý umožňuje firmware OTA (Over the Air) updates. Pri iných štandardoch je to v podstate nemožné. V mnohých prípadoch však treba počítať s nutnosťou aktualizácie firmware z princípu danej aplikácie ale aj z dôvodu, že operátor môže meniť niektoré špecifické služby v sieti. Využitie rýchlosti LTE-M siete a nízkej latencie poskytuje možnosť implementovať protokolový „stack“ IP siete so všetkými kladmi, záporni aj zabezpečovacími funkciami. [23]

Parametre a možnosti siete – Zhrnutie vybraných technické parametrov a možností NB-IoT a LTE-M sú porovnané v tabuľke Tab. 2.2.

Tab. 2.2) Porovnanie parametrov NB-IoT a LTE-M [18] [24]

| | NB-IoT | LTE-M |
|---|---|---|
| Oficiálne označenie (3GPP Rel. 13) (3GPP Rel. 14) | „LTE Cat-NB1“ „LTE Cat-NB2“ | „LTE Cat-M1“ „LTE Cat-M2“ |
| Režim nasadenia | In-band (LTE) Guard-band (LTE) Standalone (GSM) | In-band (LTE) Standalone (LTE) |
| Maximálna rýchlosť prenosu Downlink / Uplink | 30 / 60 kbps (NB1) 127 / 169 kbps (NB2) | 300 / 375 kbps (M1) 4 / 7 Mbps (M2) |
| Šírka pásma | 180 kHz (1 PRB) Standalone 200 kHz | 1080 kHz (6 PRBs) Standalone 1.4 MHz (M1) Standalone 5 MHz (M2) |
| Latencia | < 10 s | < 1 s (M1) < 15 ms (M2) |
| Zlepšenie dosahu oproti LTE | Až 7x | Až 4x |
| Spotreba energie | Všeobecne nižšia (teoreticky až 10 rokov) | Všeobecne vyššia (teoreticky až 10 rokov) |
| Mobilita / „handover“ | Čiastočná / Nie | Plná / Áno |
| Prenos hlasu a OTA updates | Nie | Áno |
| Minimálna cena modulu | < 5 € | > 5 € |

Dostupnosť – predošlé body naznačujú že LTE-M je takmer vo všetkých aspektoch rovnako dobrá alebo lepšia než NB-IoT. Z toho logicky vyplýva, že táto technológia je zvyčajne nielen drahšia, ale zároveň v súčasnosti existuje iba 50 LTE-M sietí v 34 krajinách, zatiaľ čo NB-IoT sietí je dostupných 110 v 56 krajinách sveta. [25]

Keďže však oboje technológie majú spoločnú väčšinu technických vlastností a často zdieľajú fyzickú infraštruktúru, tak i mobilní operátori sa snažia poskytnúť súčasné pripojenie do oboch sietí v prípade, že je to v danej krajine možné.

Pokrytie v ČR, dostupnosť a použitie

Medzinárodný mobilný operátor, ktorý poskytuje pripojenie do NB-IoT a LTE-M sietí aj pre českých zákazníkov je Vodafone. Operátor ponúka balíček IoT Easy Connect, ktorý umožňuje jednoduché a rýchle predplatenie tarify, vrátane potrebných SIM kariet pre IoT zariadenia. Jeho veľkou výhodou je pokrytie, ktoré v posledných rokoch rapídne narástlo a dostalo sa do stavu, že sieť pokrýva 94% populácie signálom vnútri budov a vonkajším signálom celé územie ČR, ako zobrazujú na svojej interaktívnej mape pokrytia (Obr. 2.7).



Obr. 2.7) Pokrytie Vodafone NB-IoT siete v ČR [26]

Dôležitá je informácia, že IoT Easy Connect SIM je podporovaná sieťami vybraných operátorov v EÚ aj iných zemí, hlavne USA, ale v ČR je k dispozícii iba pripojenie do siete 2G a NB-IoT. 2G v tomto prípade súvisí s režimom nasadenia standalone, pretože sa využívajú staršie GSM siete. Sieť LTE-M v Česku nie je zatiaľ dostupná (apríl 2023). [27]

Tarifa IoT Easy Connect je určený pre podnikateľov a firmy, ktorí sa venujú výrobe a spravovaniu IoT zariadení, alebo ponúkajú vlastné IoT riešenia a potrebujú konektivitu. Je vhodný primárne pre senzory a aplikácie, ktoré vysielajú dáta sporadicky alebo pravidelne malé množstvo v dlhých intervaloch.

V čase písania tejto práce (apríl 2023) stojí tarifa **IoT Easy Connect** 449 Kč, zahŕňa objem 1 GB dát a 250 SMS, obsahom balíka je aj SIM karta a platný je 10 rokov od dňa dodania. Na výber je aj druhý variant, kde namiesto bežnej SIM karty je SMD súčiastka tzv. SIM-Chip, ktorého výhody sú zhrnuté v tabuľke Tab. 2.3, avšak v tomto prípade je cena balíka 519 Kč a minimálne množstvo objednávky je 10 kusov. [28]

Tab. 2.3) Parametre a druhy dodávaných SIM kariet [27]

| | SIM Card | Industrial SIM-Card |
|--------------------------------|--|--|
| Popis | Široký rozsah aplikácií | SIM čip na spájkovanie, ktorý odolá extrémnemu prostrediu a podmienkam |
| Vhodné do náročného prostredia | Nie | Áno |
| Prevádzkový rozsah teplôt | -25 °C až 80 °C | -40 °C až 105 °C |
| Životnosť | Minimálne 2 roky | 10 rokov a viac |
| Schopnosť prevádzky | Až 10 rokov pri prevádzkovej teplote -25 °C a +25 °C | Viac než 10 rokov pri prevádzkovej teplote -40 °C a +85 °C |
| Záruka na SIM | 2 roky | 2 roky |
| Formát | Mini-SIM (2FF) Micro-SIM (3FF) Nano-SIM (4FF) | Priemyslovo spájkovateľné púzdro DFN-8 6x5 mm podľa štandardu ETSI TS 102671 |
| Minimálna veľkosť objednávky | 1 | 10 |
| Odporúčané použitie | Mnoho populárnych aplikácií IoT, vrátane vnútorných alarmov, platobných terminálov a monitorovacích zariadení. | Priemyselné a vonkajšie aplikácie (ako je bezpečnosť a meranie), kde SIM musí odolávať extrémnym podmienkam. |

Služby konektivity Vodafone pre aplikácie IoT s poskytujú prenosovú rýchlosť približne 256 kb/s v oboch smeroch, downlink aj uplink. V sieťach 2G je prenosová rýchlosť pri nahrávaní aj sťahovaní obmedzená na 128 kb/s. Zákazník môže mať na jedno IČO súčasne aktívnych maximálne 500 kusov SIM kariet. [28]

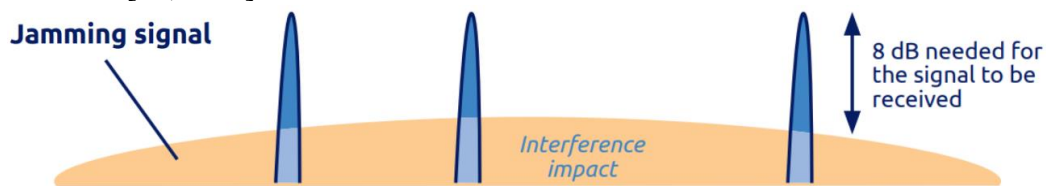
2.2.2 Sigfox

Okrem toho, že Sigfox je jednou z bezdrôtových IoT technológií, je to tiež názov protokolu, fyzickej vrstvy a v neposlednom rade francúzskej spoločnosti, ktorá technológiu vlastní a prevádzkuje od roku 2009. Nejde o voľne dostupný štandard, ale globálnu LPWA sieť operujúcu na základe protokolu, ktorý je výhradne vo vlastníctve spoločnosti Sigfox. [29]

Technológia siete

Fyzická vrstva – Kým v prípade fyzickej vrstvy sa snaží väčšina IoT technológií využívať čo najväčšiu šírku RF pásma, Sigfox medzičasom využíva úzkopásmové pripojenie až do takej miery, že v skutočnosti možno o ňom diskutovať v bitoch alebo bajtoch, a nie kilobitoch. Maximálna rýchlosť prenosu dát je okolo 600 b/s a častokrát je ešte nižšia. Zároveň je Sigfox schopná rozlíšiť veľmi slabý signál až na úrovni -125 dBm. Čo je 10⁷ krát menej ako pri WiFi a v prípade spodnej hranice výkonu -105 dBm, ktorá bola určená pre NB-IoT, 20-krát slabší signál. Samozrejme okolité RF rušenie to musí umožňovať.

Všeobecne, aby bolo možné správnu prijať musí byť signál v sieti Sigfox aspoň o 8 dB nad úrovňou šumu. [30, s. 16]



Obr. 2.8) Odolnosť voči šumu [30, s. 16]

Downlink – Sigfox sieť je veľmi šetrná, samotný „payload“ downlink správy môže mať najviac 12 bajtov. To je maximum, veľkosť sa môže ešte flexibilne meniť. Veľkosť „payload“ v odosielanom datagrame ale nie je nevyhnutne rovnaká ako je počet odosielaných bajtov, pretože protokol vyžaduje doplnenie („padding“) prázdnych bajtov za istých okolností. Napríklad ak sa odosiela 9 bajtov, protokol doplní 3 prázdne, ako je znázornené na Obr. 2.9.

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| Bytes of data | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Payload size in bytes | 0 | 1 | 4 | | 8 | | | | | | | | 12 |

Obr. 2.9) „Padding“ prázdnych bajtov v Sigfox protokole [31]

Doplnené bajty zaberajú čas a energiu ale neobsahujú žiadnu informáciu. Preto je potrebné pri návrhu firmware optimalizovať podobu „payload“ tak, aby v daných prípadoch (4, 8, 12) boli využité všetky bajty.

Navyše regulácie ETSI (European Telecommunications Standards Institute) povoľujú vysielать správy vo verejnom RF pásme len 1% času v rámci 1 hodiny. Z toho vyplýva, že maximálne množstvo odoslaných správ za 1 deň pri aplikovaní regulácií ETSI [31]:

- Hodina má 3600 sekúnd.
- 1% z 3600 je 36 sekúnd, takže zariadenie môže vysielать 36 sekúnd počas 1 hodiny.
- Rýchlosť prenosu správy v najpomalšom móde je 6 sekúnd.
- $36 / 6 = 6$ správ každú hodinu a $6 \cdot 24 = 144$ správ za 1 deň.

Keďže Sigfox si z toho 4 správy necháva pre potreby protokolu, tak zariadenie môže odoslať maximálne 140 správ denne.

Uplink – Väčšina aplikácií využívajúcich konektivitu Sigfox výhradne odosiela dáta zo senzorov na cloud. Niektoré zariadenia sa však potrebujú spoľahnúť na obojsmernú komunikáciu a podporuje to aj Sigfox.

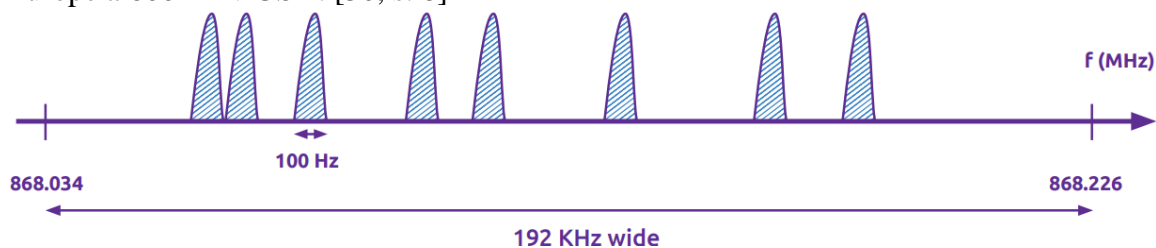
Downlink správy však umožňujú odoslať zariadeniu najviac 8 bajtov dát a celú sekvenciu riadi koncové zariadenie, pretože dáta môžu byť odoslané iba ak o to zariadenie vopred požiada.

1. Zariadenie požiada o odoslanie downlink správy tým, že odošle uplink správu, ktorá v sebe zahŕňa „request flag“.
2. Sigfox back-end zaistí, že zákaznícky server zozbiera pripravené informácie pre dané zariadenie.
3. Niekoľko sekúnd neskôr sieť odošle downlink správu zariadeniu.

Maximálny počet downlink správ denne je 4. [32]

Nasadenie technológie – Keďže technológia operuje v nelicencovanom RF spektre, spoločnosť spolupracuje s regulačnými úradmi jednotlivých krajín aby zabezpečila nasadenie iba v dostupných frekvenčných pásmach. V Európe je poskytovaná na základe všeobecného

oprávnenia k používaniu kmitočtu v pásme 868,034 – 868,226 MHz na príjem dát (downlink) a 869,425 – 869,625 MHz na odosielanie (uplink). Vo zvyšných častiach sveta sa využívajú časti pásma zo spektra 902 až 928 MHz. Spôsob technológie je založený na prenosovej schéme Ultra Narrow Band (UNB) a vysielaná správa má vo frekvenčnej doméne šírku iba 100 Hz v Európe a 600 Hz v USA. [30, s. 8]



Obr. 2.10) Sigfox technológia založená na UNB [30, s. 8]

A hoci je v princípe Sigfox iba jedna veľká zdieľaná sieť, vďaka vlastnému protokolu a infraštruktúre poskytuje možnosť vyčleniť časť siete pre potreby konkrétnej aplikácie. Toto oddelenie je realizované či už v zmysle častí frekvenčného spektra alebo priamym pridelením sieťových serverov, vysielacích staníc a nasadením dedikovaných BS v danej oblasti. Alokácia vyčlenených zdrojov zabezpečí zákazníkovi efektívnejšiu a bezpečnejšiu komunikáciu pre potreby jeho aplikácie. [29]

Architektúra siete – Sigfox architektúra je podobná „cellular“ sieťam v tom, že signál sa odosiela zo zariadenia najskôr do BS, ktorú spravuje lokálny operátor v danej krajine. Rozdiel je však v tom, že zariadenie nie je napojené iba na konkrétnu BS ale vysielané správy môže prijať hociktorá BS v okolí, čo sú v priemere asi 3. „Gateway“ alebo brána medzi Sigfox sieťou a internetom je integrovaná v BS a posiela informácie na back-end siete, kde servery ich už prepošlú používateľovi do jeho aplikácie alebo na cloud. Na vývojára spadá zodpovednosť iba za inicializačné nastavenie IoT zariadenia a spracovanie prichádzajúcich dát. K týmto dátam typicky pristupuje pomocou APIs a nastavením „callback“ funkcií na strane Sigfox serverov. [29]

Parametre siete – Vybrané parametre siete sú zhrnuté v Tab. 2.4.

Tab. 2.4) Parametre siete Sigfox [30] [31]

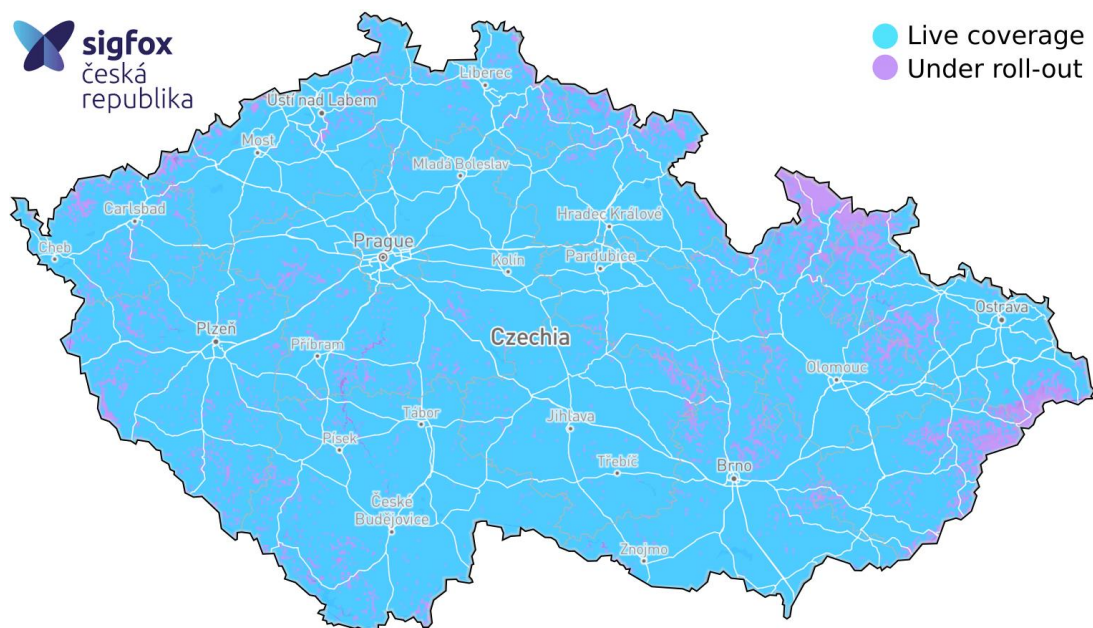
| | |
|-----------------------------------|---|
| Šírka pásma | 192 kHz |
| Citlivosť | -125 dBm |
| Latencia | < 25 s |
| Čas prenosu („airtime“) | < 6 s |
| Maximálna UL prenosová rýchlosť | EU: 100 b/s, USA: 600 b/s |
| Prenosová vzdialenosť | < 50 km (vo voľnej krajine) < 3 km (v meste) |
| Počet DL správ za deň x „payload“ | max. 144 x 12 B |
| Počet UL správ za deň x „payload“ | max. 4 x 8 B |
| Životnosť batérie | > 10 rokov |
| Minimálna cena modulu | ~ 2 € |

Požiadavky na zariadenia – Všetky kompatibilné moduly Sigfox musia byť jednorazovo certifikované aby spĺňali vyžarovací výkon, ktorý je maximálne 25 mW, čo je pre predstavu porovnateľné s diaľkovým ovládačom od auta.

Prístup do siete – Kúpou certifikovaného modulu spravidla dostane zákazník aj vstup do siete v rámci predplatného na 1 rok. Každé zariadenie má unikátny identifikátor Device ID a kód PAC (Porting Authorization Code), pomocou ktorých používateľ aktivuje svoje zariadenie vo webovom rozhraní Sigfox cloud. Služba uchováva prichádzajúce dáta, ktoré je možné stiahnuť vo formáte CSV alebo ich preposlať na servery zákazníka pomocou „callbacks“. Pre urýchlenie integrácie medzi Sigfox back-endom a back-endom veľkých IoT služieb ako je AWS od Amazonu, Microsoft Azure alebo IBM Watson ponúka Sigfox cloud predpripravené „callbacks“. Zákazníci si však môžu definovať aj vlastné funkcie pre niekoľko svojich zariadení súčasne, ak ich zaradia do spoločnej Device Type skupiny. Údaje, ktoré môže „callback“ vyčítať z každej správy zahŕňajú napríklad ID zariadenia, čas, SNR (Signal to Noise Ratio), stanicu, RSSI a ďalšie. Informácie možno jednoducho preposielať na zadaný email alebo využitím HTTP/S requestov na servery. Pri obojsmernej komunikácii je potrebné nadefinovať aj downlink „callbacks“, aby dáta pre koncové zariadenia boli správne naformátované. [33]

Pokrytie v ČR, dostupnosť a použitie

Poskytovateľ pripojenia do siete pre českých zákazníkov bol donedávna operátor Simplecell, ktorý dnes patrí pod Sigfox Česká republika. Spoločnosť pokrýva v Česku 94 % územia, 96 % populácie vonkajším signálom a 85 % obyvateľov vnútri budov a v suterénoch. [34]



Obr. 2.11) Pokrytie Sigfox siete v ČR [35]

Sigfox ponúka na výber z 3 úrovní predplatného pre zákazníkov, ktorí majú záujem o pripojenie do 1000 zariadení. Pri počte nad 1000 je cena na vyžiadanie a závisí od aplikácie. Funkcionalita Atlas Native je prvá lokalizačná služba siete Sigfox. V rámci predplatného sa jedná o dobrovoľné rozšírenie. Spustená je od roku 2017 a poskytuje geografické súradnice hociktorého zariadenia so Sigfox modulom bez potreby GPS alebo iných HW/SW komponentov. Funguje tak, že Sigfox prijíma repliky správ vyslaných zo zariadenia, ktoré sa spracujú v Geomodule. Ten zbiera repliky v intervale 25 sekúnd a na základe nich určí polohu

zariadenia a spustí príslušný „callback“. Zákazník tak môže vidieť real-time informácie o polohe, ktoré zahŕňajú zemepisnú šírku, dĺžku a rádius, v ktorom sa zariadenie približne nachádza. [36]

Tab. 2.5) Cenník predplatného Sigfox (apríl 2023) [37]

| Predplatné | Maximálny počet správ | Maximálny počet bajtov za týždeň | Cena / zariadenie / rok (+ Atlas Native) |
|------------|-------------------------------|----------------------------------|--|
| BASIC | UL: 2 denne DL: 1 týždenne | 176 | 140 (+ 3) Kč |
| PLUS | UL: 70 denne DL: 2 denne | 5 992 | 215 (+ 7) Kč |
| ULTRA | UL: 140 denne DL: 4 denne | 11 984 | 247 (+ 13) Kč |

Za roaming neplatí užívateľ nič navyše, je automaticky prístupný vo všetkých oblastiach kde Sigfox operuje, v súčasnosti viac ako v 70 krajinách sveta.

Čo sa týka skutočných aplikácií, Sigfox technológia ponúka široké spektrum možností. Od Industry 4.0 a SmartCity až po stráženie domácich miláčikov. Hodí sa na rôzne merania, priebežné odpočty stavu, zabezpečenie, sledovanie havarijných stavov, servisné kódy a pod. Na druhej strane je tu nemalá škála aplikácií, kde sa Sigfox nehodí, ako napríklad nositeľné technológie („wearables“, smart hodinky). Nie je vhodná na automatizáciu, kde je požadované real-time ovládanie a kde je jednoduchšie použiť WiFi, ZigBee alebo Zwave. A nehodí sa ani v prípade, že je potrebná obojstranná komunikácia niekoľkokrát za deň ako napríklad platobné terminály, kde naopak NB-IoT je určite lepším kandidátom. [34]

2.2.3 LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wireless Area Network) je komunikačný protokol a architektúra IoT siete operujúcej v nelicencovanom frekvenčnom pásme. Založená je na technológii LoRa, ktorá moduluje dáta do elektromagnetických vln na fyzickej vrstve umožňujúcej rádio komunikáciu na veľké vzdialenosti. [38]

Technológia siete

Fyzická vrstva – Fyzická vrstva LoRa vychádza z modulácie CSS (Chirp Spread Spectrum). Pri použití CSS modulácie je generovaný takzvaný „chirp“ signál, ktorý mení svoju frekvenciu lineárne s časom. Ak sa frekvencia zvyšuje od spodnej hranice po hornú hranicu pásma ide o „chirp-up“, v opačnom prípade „chirp-down“ signál. Na tento signál sa moduluje prenášaná digitálna informácia.

Výhodou CSS modulácie je jej odolnosť voči Dopplerovmu efektu. Dôsledok linearity „chirp“ signálu je, že frekvenčné rozdiely medzi vysielačom a prijímačom sú priamo úmerné časovým rozdielom. Tento vzťah umožňuje upraviť fázu prijímaného signálu pomocou korekčných algoritmov v časovej doméne. Eliminácia potreby aplikovať komplexné algoritmy vo frekvenčnej doméne znižuje energetickú náročnosť. Frekvenčný rozdiel môže byť až 20 % šírky pásma bez vplyvu na schopnosť dekódovať signál, čo pomáha znížiť cenu LoRa modulov, pretože nie je nutné implementovať vysoko presné kryštály. [39]

Nasadenie technológie – Podobne ako Sigfox aj LoRaWAN je nasadená v pásme ISM (Industrial, Scientific, Medical). Rozdiel je však v tom, že kým Sigfox využíva šírku kanálu

192 kHz, v prípade LoRaWAN je šírka 1 kanálu 125, 250 alebo až 500 kHz, vďaka čomu poskytuje vyššie prenosové rýchlosti. Zároveň sa LoRaWAN elegantne vyhýba obmedzeniu vysielať iba 1 % času tým, že podporuje komunikáciu na viacero kanáloch. To umožňuje realizovať niekoľko prenosov súčasne a na väčšie vzdialenosti.

V Európe je nasadená v 10 RF kanáloch v 863 až 870 MHz pásme. 8 kanálov umožňuje dátový prenos 250 b/s – 5,5 kb/s, jeden 11 kb/s a posledný 50 kb/s. V USA sa používajú prevažne pásma 902 – 928 MHz, Indii 865 – 867 MHz a vo zvyšku Ázie 915 až 928 MHz. Technológia tiež môže byť nasadená v 2.4 GHz pásme, ktoré je dostupné celosvetovo. [40]

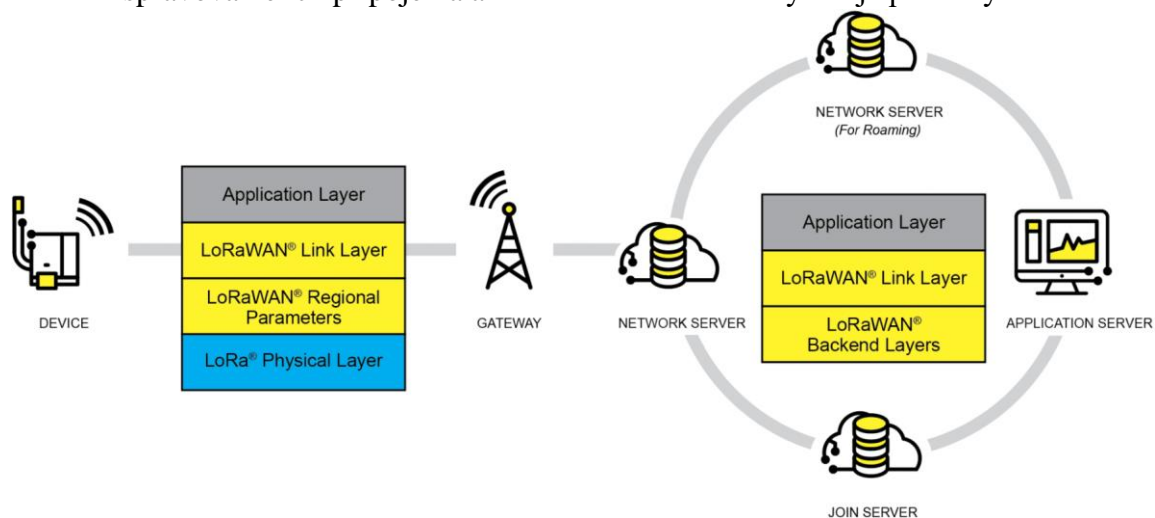
Architektúra siete – LoRaWAN siete využívajú hviezdicovú topológiu a typická sieť sa skladá z nasledujúcich elementov [41]:

- Koncové zariadenia – Sensory a aktuátory, ktoré odosielaajú alebo prijímajú modulované LoRa správy z gateways. Zvyčajne napájané z batérií.
- Gateways – Prijímajú správy koncových zariadení a preposielaajú ich na sieťové servery. Spôsob akým sú pripojené k sieťovým serverom sa označuje „backhaul“ a ide o výrazne rýchlejšie spojenie založené na inej technológii ako napríklad WiFi, Ethernet, optické vlákna ale napríklad aj „cellular“ technológie (3G, 4G, 5G) alebo LTE-M a NB-IoT.

Indoor brány (picocell) sú lacné, majú integrovanú anténu a sú vhodné na pokrytie menších priestorov pod zemou alebo v niekoľkokoposchodových budovách.

Outdoor brány (macrocell) sú určené nielen do mestských ale aj odľahlých oblastí. Môžu byť primontované k „cellular“ vežiam aj vysokým budovám a zvyčajne majú väčšiu externú anténu.

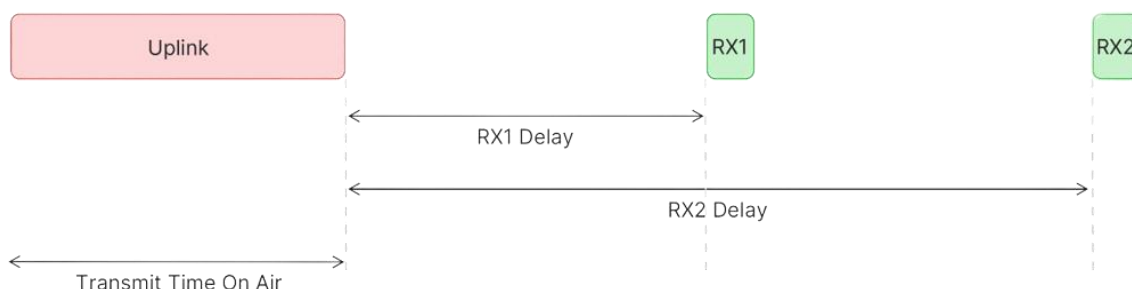
- Sieťový server – Software, ktorý riadi všetky prvky siete. Medzi funkcionality LoRaWAN serverov patrí napríklad zabezpečenie prenosu správ medzi koncovými zariadeniami a aplikačným serverom (zabezpečenie typu end-to-end), deduplikácia uplink správ, výber vhodnej brány pre downlink správy a pod.
- Aplikačné servery – Časť software bežiaceho na serveri, ktorý je zodpovedný za bezpečné spracovanie aplikačných dát. Generuje všetky downlink správy určené pre koncové zariadenia.
- Join server – Zariadenia posielajú „Join-request“ správy sieťovým serverom, aby ich preposlali na Join server. Ten je zodpovedný za bezpečnú aktiváciu zariadení, spravovanie ich pripojenia a komunikáciu so sieťovými aj aplikačnými servermi.



Obr. 2.12) Architektúra LoRaWAN siete [42]

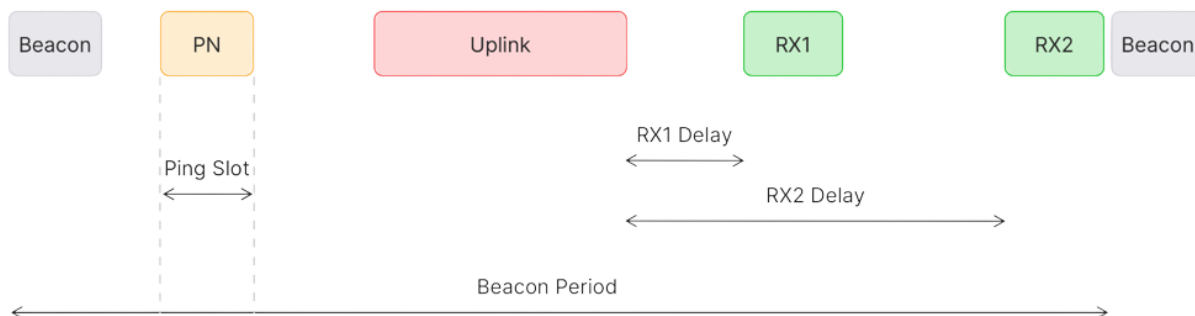
Triedy zariadení – LoRaWAN špecifikácia definuje 3 triedy zariadení: A, B a C. Všetky triedy zariadení podporujú uplink aj downlink a musia implementovať vlastnosti triedy A, zatiaľ čo triedy B a C sú iba jej rozšírením. [43]

Pri zariadeniach **triedy A** iniciuje komunikáciu iba koncové zariadenie. Zariadenie môže vyslať uplink správy kedykoľvek ale až ním môže nastať downlink prenos. Po ukončení uplink prenosu nastáva krátke oneskorenie a následne zariadenie otvorí 2 krátke downlink okná (RX1 a RX2 na Obr. 2.13). Ak sieťový server neodpovie počas týchto dvoch časových okamihov, downlink správa sa môže znova odoslať až po ďalšom uplink prenose. Zariadenia triedy A sú zvyčajne napájané z batérií, pretože majú nízku spotrebu a väčšinu času sú v režime spánku. Medzi uplink správami sú dlhé časové intervaly a majú vysokú downlink latenciu (pretože každý downlink čaká na uplink).



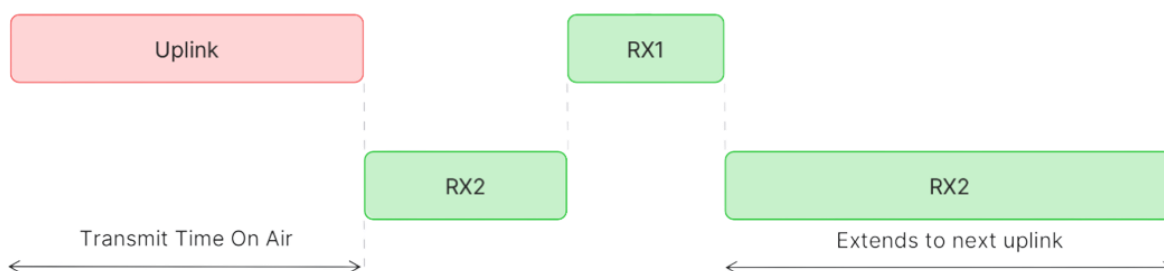
Obr. 2.13) Uplink / downlink LoRaWAN zariadení triedy A [43]

Trieda B pridáva pravidelné downlink okná na prijímanie správ zo sieťového servera. Zariadenie sa časovo synchronizuje pomocou „beacon“ signálov, ktoré vysiela gateway. Zariadenie otvára downlink ping sloty s pravidelnou periódou na prijímanie správ zo sieťového servera a stále sú tu aj downlink okná ako vidno na Obr. 2.14. Tieto zariadenia majú nižšiu latenciu, pretože downlink nemusí čakať na uplink, ale cenou je vyššia spotreba energie.



Obr. 2.14) Uplink / downlink LoRaWAN zariadení triedy B [43]

Zariadenia **triedy C** sa neuspávajú a prijímajú správy po celú dobu, kedy nevysielajú. Latencia je minimálna ale spotreba vysoká, preto sa jedná iba o zariadenia s pripojením do siete. Využitie napríklad pri diaľkovo nastaviteľných ventiloch alebo pouličnom osvetlení.



Obr. 2.15) Uplink / downlink LoRaWAN zariadení triedy C [43]

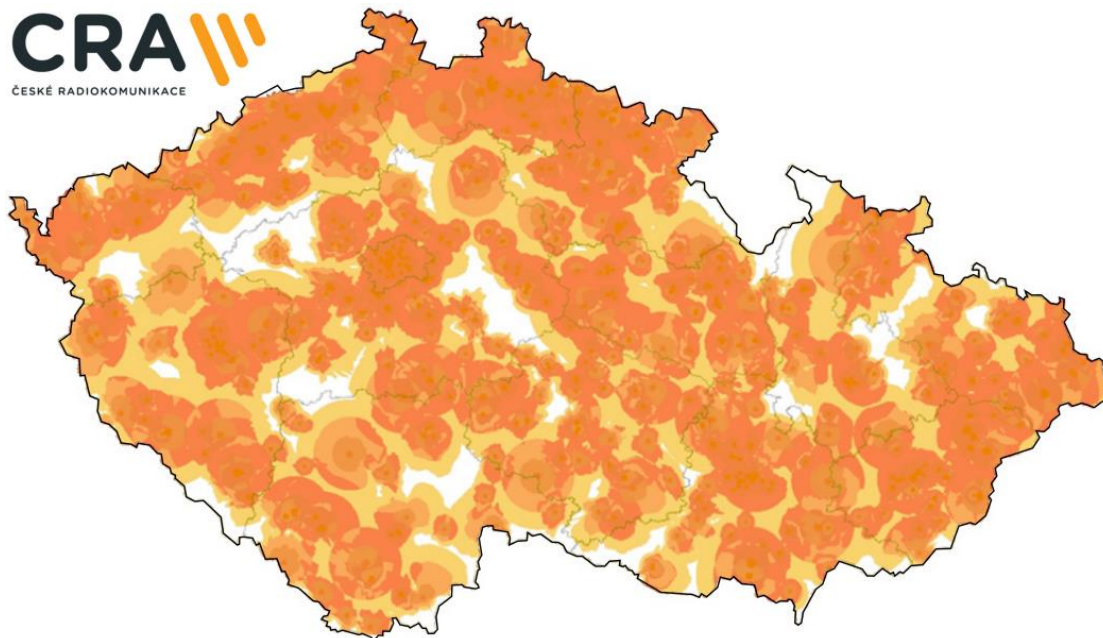
Parametre siete – Niektoré dôležité parametre siete sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 2.6) Parametre siete LoRaWAN [40]

| | |
|-----------------------|---|
| Šírka pásma | 125 / 250 / 500 kHz |
| Citlivosť | -120 dBm |
| Latencia | Záleží od triedy zariadenia |
| Počet kanálov | až 10 |
| Rýchlosť prenosu | 250 b/s – 50 kb/s |
| Prenosová vzdialenosť | < 40 km (vo voľnej krajine) 2 – 5 km (v meste) |
| „payload“ v 1 správe | max. 242 bajtov |
| Počet správ za deň | teoreticky neobmedzený |
| Životnosť batérie | > 10 rokov |
| Minimálna cena modulu | 3 – 5 € |

Pokrytie v ČR, dostupnosť a použitie

V Českej republike je hlavným prevádzkovateľom siete LoRaWAN spoločnosť CRA (České Radiokomunikace). V porovnaní s predošlými LPWA sieťami je však jej pokrytie v Česku najnižšie, približne 70 % územia, čo je znázornené na Obr. 2.16, kde tmavšie oblasti značia vyššiu intenzitu signálu.



Obr. 2.16) Pokrytie LoRaWAN siete v ČR [44]

Cena pripojenia do LoRaWAN siete CRA je rovnako ako v prípade iných sietí závislá na objeme dát a počte pripojených zariadení. Výber predplatného v čase písania tejto práce je zhrnutý v Tab. 2.7.

Tab. 2.7) Cenník predplatného CRA (apríl 2023) [45]

| Predplatné | Počet zariadení | Mesačný limit správ | Maximálny počet API requestov | Viazanosť | Cena |
|-------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------|
| PILOT | max. 10 | UL: 1 000 DL: 10 000 | 1 000 | 12 mesiacov | 200 Kč |
| INDIVIDU - ÁLNE | individuálne | UL: individuálne DL: individuálne | 1 000 000 | min. 12 mesiacov | podľa zmluvy |
| NA SKÚŠKU (1 MESIAC) | max. 5 | UL: 100 DL: 1 000 | 1 000 000 | bez viazanosti | zadarmo |

Alternatívnym riešením k CRA je LoRaWAN sieť The Things Network od globálneho poskytovateľa The Things Industries. The Things Industries poskytuje celý rad produktov a služieb, ktoré zahŕňajú sieťové servery, gateways aj koncové zariadenia a sú zamerané na veľké korporáty aj menšie firmy a jednotlivcov.

The Things Stack je ich sieťový server LoRaWAN umožňujúci konektivitu, spravovanie a monitorovanie zariadení, brán a používateľských aplikácií. Od januára 2021 podporuje sieť TTN (The Things Network) free verziu tohto serveru, ktorá sa nazýva The Things Stack Community Edition a je určený práve pre menších zákazníkov. Tí majú možnosť pripojenia k LoRaWAN sieti, ktorú spravuje viac než 100 000 členov TTN komunity v 153 krajinách po celom svete. Zákazník tak môže rýchlo otestovať LoRaWAN konektivitu pre svoju aplikáciu.

Oproti technológiám ako NB-IoT a Sigfox je pokrytie v našom regióne menšie, hlavne mimo väčších miest, a preto ak sa nepodarí pripojiť sa na verejne dostupné brány iných členov komunity je potrebné zakúpiť a nasadiť vlastnú bránu. Pre predstavu gateway [46] s výkonom do 27 dBm, „backhaul“ v podobe Ethernetu alebo WiFi a 8 kanálmi poskytuje vo voľnom priestore pokrytie v okruhu asi 15 km, v meste do 2 km a stojí okolo 7 000 Kč. To samozrejme zvyšuje náklady v prípade implementácie LoRaWAN technológie pri danej aplikácii.

Ďalšia vec, na ktorú musí zákazník myslieť je, že free verzia negarantuje dostupnosť, tzv. „uptime“ serveru. Pre komerčné aplikácie sa odporúča server The Things Stack vrátane zmluvy SLA (Service Level Agreement), ktorá špecifikuje podmienky poskytovaných služieb, pričom The Things Industries garantujú server „uptime“ 99,9 % času. Výhodou je, že keď už je raz koncept projektu otestovaný a pripravený, škálovanie nie je problém. [47]





Aby aplikácia vyťažila maximum z batérie a zároveň nepotrebovala veľa gateways je dôležité pri návrhu aplikovať niektoré pravidlá, ako napríklad odosielať menší payload kódovaním dát v binárnom formáte, obmedziť interval medzi prenosom na niekoľko minút a použiť vyšší data rate na minimalizáciu vysielacieho času. Okrem toho je vhodné odosielať dáta iba ak sa meraná hodnota zmení viac ako stanovený threshold a pod.

LoRaWAN je všeobecne vhodná technológia pre diaľkové nízkoenergetické aplikácie, ako je monitorovanie životného prostredia, sledovanie zvierat, detekcia požiaru, preventívna detekcia zemetrasenia, určovanie polohy alebo merače spotreby. Za istých okolností umožňuje aj firmware OTA updates. Nie je však vhodná pre real-time aplikácie a tie, ktoré vyžadujú široké pásmo, prenos hlasu, odosielanie fotografií alebo streamovanie video obsahu.

2.2.4 Porovnanie LPWANs

Tab. 2.8 zobrazuje súhrn informácií týkajúcich sa LPWA sietí v našom regióne. Konkrétne ide o NB-IoT (špecifikácia LTE Cat-NB2), LTE-M (špecifikácia LTE Cat-M1), Sigfox a LoRaWAN.

Tab. 2.8) Porovnanie vybraných LPWA sietí [18] [24] [30] [40] [47]

| |  NB-IoT |  LTE-M |  sigfox |  LoRaWAN |
|----------------------------|--|---|---|---|
| Spektrum | LTE a GSM (licencované) | LTE (licencované) | ISM (nelicencované) | ISM (nelicencované) |
| Frekvenčné pásma | 700 – 2200 MHz | 700 – 2200 MHz | 863 – 928 MHz | 863 – 928 MHz |
| Šírka pásma | 180 kHz max 200 kHz | 1080 kHz max 1,4 MHz | 192 kHz | 125, 250, 500 kHz |
| Modulácia | QPSK, BPSK | QPSK, 16QAM | UL: DBPSK DL: GFSK | CSS |
| Prenosová schéma | UL: SC-FDMA DL: OFDMA | UL: SC-FDMA DL: OFDMA | UNB | LoRa |
| Prenosová rýchlosť | UL: 169 kb/s DL: 127 kb/s | UL: 375 kb/s DL: 300 kb/s | EU: 100 b/s USA: 600 b/s | 250 b/s – 50 kb/s |
| Vysielací výkon zariadenia | 14, 20, 23 dBm | 20, 23 dBm | EU: 14 dBm USA: 22 dBm | 15 dBm |
| MCL ⁶ | 164 dB | 160 dB | 149 dB | 157 dB |
| Citlivosť | teoreticky až -114 dBm | teoreticky až -108 dBm | teoreticky až -125 dBm | teoreticky až -120 dBm |
| Max. payload 1 správy | 1 600 B | 1 280 B | UL: 12 B DL: 8 B | 242 B |
| Max. počet správ za deň | nelimitovaný | nelimitovaný | UL: 140 DL: 4 | nelimitovaný |
| Štandardizácia | 3GPP | 3GPP | Sigfox | LoRa Alliance |
| Dostupnosť | 56 krajín | 34 krajín | 72 krajín | 153 krajín |
| Sledovanie polohy | iba s GPS | iba s GPS | Atlas Native, Atlas WiFi | LoRaWAN geolocation |
| Minimálna cena modulu | ~ 5 € | ~ 10 € | ~ 2 € | ~ 4 € |

⁶ Maximum Coupling Loss vyjadruje maximálnu stratu výkonu signálu medzi vysielačom a prijímačom, ktorú systém zvládne, aby bol schopný fungovať. MCL nepriamo vyjadruje pokrytie signálom bez závislosti na nosnej frekvencii a okolitom prostredí.

Údaje v uvedenej tabuľke naznačujú, že hoci sa jedná o konkurenčné LPWA siete, ich vlastnosti a technické parametre ich predurčujú na odlišné aplikácie.

V súčasnej dobe je z licencovaných technológií dostupná na území Česka iba NB-IoT, ktorá je vhodná na náročnejšie aplikácie vyžadujúce vyššie prenosové rýchlosti a zároveň veľmi dobré pokrytie pretože využíva existujúcu LTE infraštruktúru. Vodafone ponúka výhodnú tarifu s platnosťou až na 10 rokov, veľkým objemom dát a pokrytím aj v okolitých krajinách.

Sieť Sigfox je určená na najmenej náročné aplikácie z hľadiska objemu dát ale naopak poskytuje veľký dosah, nízku spotrebu energie a zaujímavé možnosti sledovania polohy bez potreby GPS.

LoRaWAN je v mnohých aspektoch na rozmedzí predošlých technológií, ale jeho problém spočíva v nižšom pokrytí a v prípade voľby komunitnej siete aj v potrebe využitia cudzích gateways alebo nasadenia vlastných.

V tabuľke nie je uvedené porovnanie cien za prenos jednotky objemu dát v jednotlivých sieťach. Dôvodom je, že tieto siete sú zamerané na rôzne aplikácie, môžu mať limitovaný počet prenesených správ za deň a používajú rozdielny protokol stack, čo má tiež vplyv na objem dát, ktorý sa míňa z predplateného balíka. Takéto porovnanie preto nie je úplne na mieste, avšak ak by bola táto informácia zaujímavá z hľadiska rozhodovania sa pre niektorú zo spomínaných technológií, hodnoty by boli nasledovné.

Cena za prenos 1 kB dát v sieti NB-IoT od Vodafone s obvyčajným predplateným IoT Easy Connect, ktorý ponúka 1 GB dát za 449 Kč je 0,00043 Kč/kB.

Najvýhodnejšie predplatné v sieti Sigfox ponúka balík Ultra, ktorého súčasťou je 11984 uplink bajtov na týždeň za cenu 247 Kč/rok, pričom rok má približne 52 týždňov. Cena za prenos 1 kB dát pri maximálnom vyčerpaní ročného limitu predplateného je potom 0,40587 Kč/kB, čo je takmer 1000 krát viac ako v prípade NB-IoT.

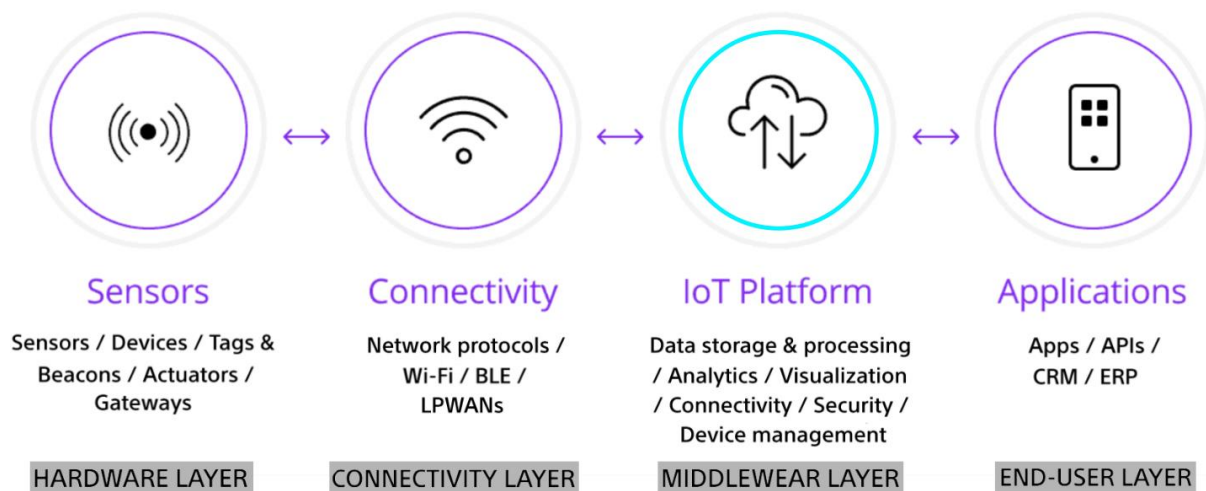
V sieti LoRaWAN s predplateným Pilot od CRA je k dispozícii 1000 uplink správ mesačne za cenu 200 Kč na 12 mesiacov až pre 10 zariadení. Maximálna veľkosť správy v najvyššej európskej data rate triede DR7 je 242 bajtov a výsledná cena za prenos 1 kB dát pri vyčerpaní ročného limitu predplateného pre všetkých 10 zariadení je 0,00705 Kč/kB. To je asi 58 krát menej oproti Sigfox a ale stále 16 krát drahšie ako v prípade NB-IoT.

Nadalej teda platí, že keď dôjde na výber konkrétnej komunikačnej technológie pre IoT aplikácie, treba zvážiť mnoho faktorov. Momentálne však v kontexte ponuky na Českom trhu je NB-IoT asi najviac univerzálna voľba s ohľadom na výšku nákladov, pokrytie a technické parametre siete.

2.3 IoT platformy

Dnešné IoT systémy pozostávajú na jednej strane z hardwaru, následne komunikačnej vrstvy a až na druhom konci je používateľská aplikácia. Žiadne IoT riešenie sa preto nezaobíde bez IoT platformy, ktorá funguje ako sprostredkovateľ medzi týmito vrstvami (Obr. 2.17).

Cloudové IoT platformy poskytujú moderný spôsob ako prepojiť zariadenia a aplikácie v rámci uceleného ekosystému. Pretože výrazným spôsobom uľahčujú zákazníkovi spôsob ako postaviť ich vlastné aplikácie a služby s využitím built-in nástrojov, často sa označujú ako IoT PaaS (Platform-as-a-Service). Funkcionalita IoT platformy zahŕňa spravovanie zariadení z cloudu, možnosti vzdialeného ovládania, zber, spracovanie a vizualizáciu dát zo zariadení, pravidelnú aktualizáciu aplikácií aj správu prístupových práv používateľov. [48]



Obr. 2.17) Architektúra IoT systému [49]

2.3.1 Porovnanie IoT platforiem

Medzi významných hráčov na trhu cloudových IoT platforiem patria najväčšie technologické spoločnosti ako Amazon, Microsoft a zatiaľ aj Google, ktorá ale prednedávnom oznámila, že k 16. augustu 2023 ukončuje prevádzku ich platformy Google Cloud IoT Core. [50] Vďaka tomu ako veľký je však trh IoT riešení, existuje aj mnoho ďalších IoT platforiem a nie je tak jednoduché sa v danej ponuke zorientovať.

Jednotlivé spoločnosti sa snažia od konkurencie odlíšiť najmä ponúkanými službami a samozrejme poplatkami, ktoré majú rôzne nastavené. Veľké spoločnosti poskytujú vlastné SW nástroje, SDKs (Software Development Kits) s podporou mnohých programovacích jazykov alebo ponúkajú možnosti „Free Trial“ svojich platforiem, aby prilákali menších a často nerozhodnutých zákazníkov.

Platformy podporujú rozdielne komunikačné protokoly, čo môže byť dôležitý faktor pre danú IoT aplikáciu a výber komunikačného modulu. Okrem známeho protokolu HTTP (Hypertext Transfer Protocol) sa najčastejšie používa jednoduchý, light-weight protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) špeciálne určený na komunikáciu IoT zariadení. Nájdu sa tu však aj menej známe IoT protokoly ako AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), čo je asynchrónny protokol založený na otvorenom štandarde alebo XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol), ktorý využíva XML textový formát.








Všetky tieto protokoly patria do najvyššej, aplikačnej vrstvy OSI modelu. Niektoré operujú priamo nad sadou protokolov TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), ale zvyčajne sú ešte zaobalené do WebSockets, čo je full-duplex komunikačný kanál v rámci TCP pripojenia.

Téma súkromia, bezpečnosti a zabezpečenia online komunikácie je v dnešnej dobe často spomínaná. Aj preto prakticky všetky veľké IoT platformy podporujú bezpečný prenos informácií prostredníctvom TLS (Transport Layer Security), najčastejšie verzie 1.2 s využitím certifikátov X.509. Certifikáty X.509 overujú identitu účastníkov komunikácie na základe digitálneho podpisu. Vystavujú ich tzv. CAs (Certificate Authorities) a obsahujú verejný kľúč určený na kódovanie správ a súkromné kľúče, ktoré si uchovávajú obe strany lokálne a pomocou nich šifrované správy dekodujú.

V tabuľke Tab. 2.9 sú stručne porovnané známe cloudové IoT platformy na základe protokolov, ktoré podporujú a na základe ich populárnych služieb a vlastností. Systém

spoplatňovania jednotlivých platforiem je pomerne komplikovaný a tak sú nižšie zhrnuté aspoň faktory, od ktorých poplatky za používanie ich služieb závisia. Uvedené sú cloudové platformy Amazon AWS IoT, Microsoft Azure IoT, IBM Watson IoT, Oracle IoT Intelligent Applications, Google Cloud IoT Core, Kaa IoT platform a analytická IoT platforma ThingSpeak od Mathworks.

Tab. 2.9) Cloudové IoT platformy [49], [48], [50], [51], [52], [53], [54], [55]

| | Protokolový stack | Kľúčové služby alebo vlastnosti | Poplatky závisia od |
|---|-------------------------------|--|--|
|  | HTTP, MQTT, TCP/IP, WebSocket | FreeRTOS, SDKs, AWS IoT Core, AWS IoT Analytics, AWS Lambda | počtu zariadení, správ, veľkosti úložiska a aktívnych služieb (ročný free trial) |
|  | HTTP, MQTT, AMQP, WebSocket | SDKs, Azure IoT Hub, Azure IoT Central, Azure IoT Edge | počtu správ, mesiacov, typu predplatného (ročný free trial) |
|  | MQTT, TCP/IP, WebSockets | SDKs, IBM IoT Analytics Service, IBM IoT Connection Service | počtu odoslaných a analyzovaných dát (neponúka free trial) |
|  | HTTP, MQTT, WebSocket | IoT Cloud Service, Asset and Production Monitoring | počtu zariadení, mesiacov, fixný počet správ (neponúka free trial) |
|  | HTTP, MQTT, TCP/IP | Cloud SDK, Cloud IoT Core, Firebase, Cloud IoT Edge | počtu zariadení, správ a veľkosti úložiska (služba končí 16.8.2023) |
|  | HTTP, MQTT XMPP, WebSocket | Device management, Configuration management, Data collection | iba počtu zariadení (14 dňový free trial pre 5 zariadení) |
|  | HTTP, MQTT, TCP/IP, WebSocket | Activity Dashboard API, simple Matlab integration | počtu zariadení a správ (free pre hobby projekty až do 3 mil. správ ročne) |

2.3.2 Amazon Web Services

Amazon Web Services je najväčší a najpoužívanejší cloud na svete. Podľa štatistických informácií publikovaných v [56], bol trhový podiel Amazon služieb v rámci cloudovej infraštruktúry v poslednom kvartáli roku 2022 okolo 32 %, zatiaľ čo druhý Microsoft Azure mal trhový podiel 23 %.

IoT služby

Dôležité je uvedomiť si, že AWS sa skladá z viac ako 200 samostatných služieb, ktoré možno navzájom integrovať a prepájať. 11 z nich je súčasťou AWS IoT platformy a Amazon ich rozdeľuje do 3 skupín [57]:

1) Služby skupiny „Device software“:



FreeRTOS – je open-source, real-time operačný systém, navrhnutý tak, aby bol schopný obslužiť deterministicky časované aplikácie, zaberá čo najmenšie množstvo pamäte a bolo ho tak možné nasadiť na embedded zariadeniach. V súčasnosti podporuje viac ako 40 architektúr mikrokontrolérov.



AWS IoT Greengrass – rozširuje možnosti AWS cloudu na „edge“ zariadenia tým, že im poskytuje možnosť lokálne využiť ich výpočtový výkon, aj keď nie sú online. Termín „edge“ odkazuje na výpočtovú infraštruktúru, ktorá existuje mimo tradičných dátových centier. Greengrass poskytuje jednoducho škálovateľný spôsob nasadenia aplikácií na „edge“ zariadeniach a zabezpečuje, že výpočtový výkon je dostupný aj v čase, keď zariadenia nie sú pripojené na cloud.



AWS IoT ExpressLink – služba poskytuje konektivitu hocikým embedded zariadeniam, pridaním HW modulov, čím ich umožňuje rýchlo premeniť na IoT zariadenia s pripojením na cloud.

2) Služby skupiny „Connectivity and control services“:



AWS IoT Core – je najdôležitejšia služba IoT platformy, ktorá má niekoľko kľúčových funkcionalít. Poskytuje nástroje AWS IoT Device SDK s podporou pre programovacie jazyky C/C++, Python, Java, JavaScript a Arduino framework. Tieto nástroje zjednodušujú pripojenie, autentifikáciu a prenos dát medzi zariadením a AWS IoT Core s využitím protokolov MQTT, HTTP a WebSocket.

Súčasťou IoT Core je aj tzv. broker a gateways. Broker je server typu Pub/Sub s veľkým data rate, ktorý sa automaticky škáluje podľa objemu prechádzajúcich správ aby zabezpečil čo najnižšiu latenciu. Gateway slúži ako vstupný bod do siete a zaisťuje dostupnosť obojsmernej komunikácie medzi zariadením a serverom.

IoT Core ďalej zhrňa celý proces autentifikácie, autorizácie a zabezpečenia komunikácie s využitím TLS a spomínaných certifikátov X.509.

A v neposlednom rade sem patrí Rules Engine. Nástroj monitoruje a vyhodnocuje všetky správy, ktoré prechádzajú cez AWS IoT Core, dokáže ich modifikovať a hlavne doručiť ich inému zariadeniu alebo cloudovej službe na základe pravidiel, ktoré si zákazník definuje. Pravidlo sa môže vzťahovať na dáta z jedného alebo celej skupiny zariadení, môže spustiť jednu alebo niekoľko funkcií paralelne. Najčastejší spôsob je napojenie na lambda funkcie, ktoré vykonajú definovaný kód a prepájajú jednotlivé AWS služby.



AWS IoT Device Defender – je ďalšia zo služieb, ktorá sa stará o bezpečnosť prenosu dát. Služba kontinuálne monitoruje zariadenia a používa machine learning algoritmy na analýzu vzorcov ich správania. Anomálie môžu naznačovať bezpečnostné riziko ako napríklad prudký nárast v počte neúspešných pripojení, nezvyčajnú snahu o komunikáciu s neautorizovaným zariadením alebo serverom a v takom prípade je potrebné upozorniť správcov systému.



AWS IoT Device Management – je určená na bezpečnú registráciu, spravovanie, diaľkové monitorovanie a update SW zariadení na veľkej škále.



AWS IoT FleetWise – sa zameriava na zákazníkov v automobilovom priemysle, pretože slúži špeciálne na efektívny zber a prenos real-time dát z dopravných prostriedkov.

3) Služby skupiny „Analytics services“:



AWS IoT SiteWise – služba je užitočná predovšetkým pre spoločnosti, ktoré potrebujú zbierať, organizovať, triediť a analyzovať dáta z veľkého množstva priemyselných strojov, robotov, dopravníkov alebo výrobných liniek, pričom môžu využiť možnosti „edge computing“.



AWS IoT Events – monitoruje vybavenie a reaguje na predom stanovené zmeny. Uľahčuje sledovať výskyt definovaných udalostí a nastaviť prioritu kritickým problémom pri údržbe veľkých systémov.



AWS IoT Analytics – je analytická služba, ktorá poskytuje zákazníkovi možnosť manipulovať s obrovským množstvom dát z IoT zariadení bez toho, aby museli vynakladať veľké finančné prostriedky na implementáciu vlastných analytických nástrojov. IoT Analytics umožňuje tiež zobraziť dáta pomocou vstavaného SQL engine a integráciu s ďalšou AWS službou, Amazon QuickSight, ktorá ich vkladá do prehľadných vizuálnych panelov.



AWS IoT TwinMaker – uľahčuje vývojárom prepojenie fyzického sveta a virtuálneho prostredia. Konkrétne ide o tvorbu digitálnych dvojčiat výrobných liniek, priemyselného vybavenia aj celých tovární a budov za účelom optimalizácie procesov, zvýšenia produktivity a efektivity.

Ďalšie služby AWS

Medzi ďalšie často používané AWS služby a nástroje patria Amazon Simple Storage Service, AWS Lambda, AWS API Gateway, AWS Identity and Access Management alebo Amazon CloudWatch [58]:



Amazon Simple Storage Service – skratene S3 je jedna z najväčších služieb AWS. Ide o cloud úložisko pre dáta typu „object“, čo zahŕňa množstvo neštruktúrovaných dát ako sú fotky, videá, audio nahrávky, ML objekty, webový obsah ale aj dáta zo senzorov. S3 zároveň poskytuje jednoduché škálovanie, dostupnosť dát 99,99 % času počas roka a integráciu s ostatnými službami.



AWS Lambda – si možno predstaviť ako lepidlo pre ostatné AWS služby. Je to „serverless“ nástroj, ktorý dokáže obslúžiť tisíce požiadaviek za sekundu a spustí sa zakaždým, keď nastane definovaná udalosť, aby vykonal určitý kód, tzv. lambda funkciu. Výhodou takéhoto prístupu je, že zákazník nemusí spravovať žiadne vlastné servery, celá obsluha udalosti zbehnú na pozadí v cloude, pričom služba je spoplatnená na základe počtu vyvolaní lambda funkcií.



AWS API Gateway – slúži pre vývojárov, ktorí hocijakým spôsobom spravujú HTTP, REST alebo WebSocket APIs. API Gateway funguje ako vstupná brána pre aplikácie, ktoré potrebujú prístup k dátam, akýmkoľvek webovým aplikáciám alebo back-end službám ako AWS Lambda. Podobne ako ostatné služby aj API Gateway je spočiatku free a neskôr spoplatnená na základe počtu volaní.



AWS Identity and Access Management (IAM) – služba zabezpečuje, že spoločnosť môže z jedného miesta spravovať prístup jednotlivcov alebo celých tímov k AWS službám, ktoré daná spoločnosť využíva. Pomocou IAM sa zároveň nastavujú prístupy medzi jednotlivými službami AWS navzájom, a preto je potrebná aj pri menších aplikáciách, na ktorých nemusí nevyhnutne pracovať veľa vývojárov.



Amazon CloudWatch – zbiera a zobrazuje real-time metriky a logy prehľadným spôsobom v automatizovanej dashboard, čím uľahčuje debugging a troubleshooting pri konfigurácii iných služieb v rámci AWS.

Toto bol len malý výber niektorých často používaných služieb, ktoré AWS ponúka. Ako však možno vidieť ide o veľmi silnú a univerzálnu sadu nástrojov pre všetky projekty bez ohľadu na ich veľkosť. Keď teda príde na výber IoT platformy a spoločnosť sa raz rozhodne pre komplexné riešenie akým je AWS cloud, mala by počítať s tým, že sa postupne uzatvorí vo veľkom Amazon ekosystéme, ktorý siaha výrazne ďalej, než sú hranice IoT aplikácií.

AWS služby sú k dispozícii vo webovom rozhraní **AWS Management Console**, ktoré samozrejme zahŕňa prístup ku všetkým službám AWS, nielen tým, ktoré sa týkajú IoT platformy. Amazon tak láka svojich zákazníkov, aby jednoducho vyskúšali mnohé služby v rámci predplatného free tier, ktoré však rýchlo rastie na cene ak sa aplikácia začne škálovať. Preto by si mali spoločnosti vopred zvážiť, či je spomedzi konkurenčných produktov práve AWS optimálnym riešením nielen z technického ale i finančného hľadiska.

2.4 IoT protokoly

Väčšina IoT platformiem podporuje, okrem iných komunikačných protokolov, predovšetkým HTTP a MQTT ako už bolo spomenuté vyššie. Tieto protokoly však boli navrhnuté na odlišné účely a v tejto kapitole budú stručne porovnané ich hlavné rozdiely z pohľadu IoT aplikácií.

2.4.1 Porovnanie IoT protokolov

Kým HTTP bol vytvorený súčasne s World Wide Web, aby uľahčil prenos dokumentov na internete, MQTT bol navrhnutý priamo pre potreby IoT. Oba operujú cez pripojenie TCP a implementujú podobnú architektúru klient-server. Ich rozdiel je v tom, že MQTT umožňuje, aby sa správy preposielali oboma smermi medzi klientom a serverom, kým HTTP servery iba odpovedajú na požiadavky klientov. Ďalší fundamentálny rozdiel je, že keď sa raz nadviaže komunikácia cez MQTT (autentifikácia, výmena kľúčov a pod.), tak ďalšia výmena správ je podstatne rýchlejšia a navyše sa dáta posielajú v binárnej forme. Na druhej strane HTTP spracováva postupne jeden request za druhým, pričom každý so sebou nesie aj nejaké informácie súvisiace s autentifikáciou a dáta reprezentuje v textovom formáte. [59]

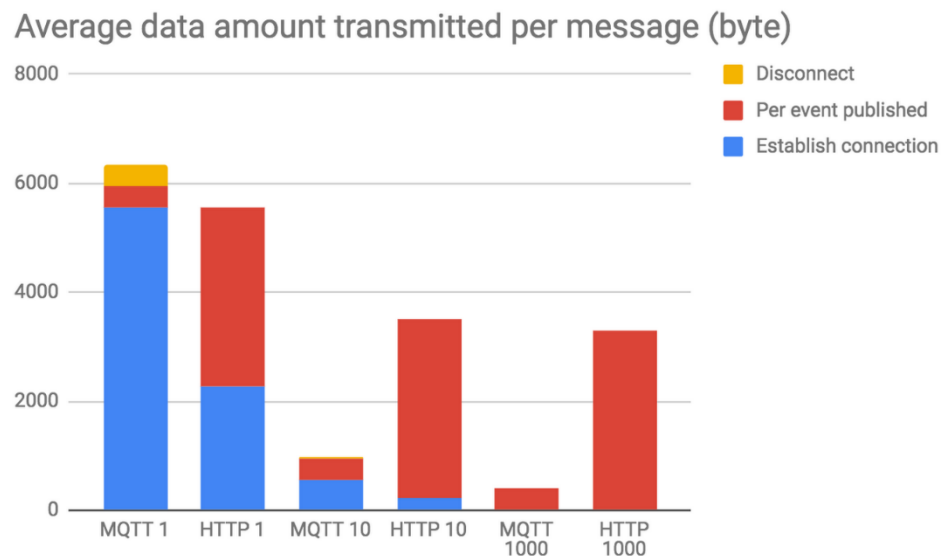
Výsledky z porovnania týchto 2 protokolov pri káblovom pripojení sú uvedené v [60], kde merali rýchlosť odpovede pri posielaní jednoduchého JSON objektu.

Tab. 2.10) Priemerný čas odpovede na 1 správu [59]

| Počet správ v 1 pripojení | MQTT [ms] | HTTP [ms] |
|---------------------------|-----------|-----------|
| 1 | 113 | 289 |
| 100 | 47 | 289 |
| 1 000 | 43 | 289 |

Meranie bolo uskutočnené s nastavením MQTT QoS 1 (Quality of Service), čo znamená, že po každej správe sa očakáva potvrdenie o jej prijatí. Zníženie času odpovede pri odosielaní viacerých MQTT správ, ktoré vidno v tabuľke Tab. 2.10, bolo očakávané, pretože čas potrebný na jednorazové nadviazanie komunikácie cez TCP má o to menší vplyv na priemer, čím viac správ sa pošle. A hoci existujú spôsoby ako zlepšiť rýchlosť komunikácie a zmenšiť podiel overhead aj pri HTTP, ale nie až na úroveň MQTT.

To sa ukázalo pri ďalšom meraní na obrázku Obr. 2.18, kde sledovali priemernú veľkosť všetkých dát (payload + overhead), ktoré sa odošlú káblom pri poslaní 1, 10 a 1000 správ cez MQTT a HTTP. V grafe sú tiež farebne odlíšené časti, ktoré pomerovo zodpovedajú za otvorenie komunikácie, samotný prenos dát a v prípade MQTT aj ukončenie komunikácie.

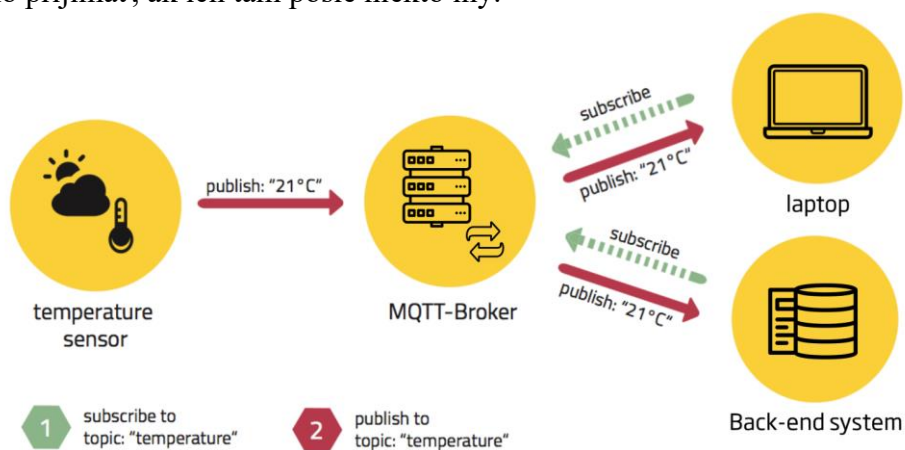


Obr. 2.18) Priemerný počet odoslaných bajtov na 1 správu [60]

Výsledkom je, že nevýhodou MQTT v porovnaní s HTTP je cena za otvorenie spojenia medzi klientom a serverom. Ak by sa odosiela iba 1 správa v rámci 1 TCP session, overhead je väčší ako pri HTTP. Toto však nie je bežný scenár v IoT aplikáciách, keďže v 1 session možno odoslať niekoľko správ a v takom prípade výhodnosť použitia MQTT prudko narastá. HTTP má pri IoT aplikáciách zmysel iba tam, kde zariadenie už implementuje nejakým spôsobom HTTP klienta a možno ho tak priamo použiť alebo si to vyžaduje daná IoT platforma.

2.4.2 MQTT protokol

MQTT je jednoduchý protokol určený pre M2M a IoT komunikáciu, ktorý využíva návrhový vzor publish-subscribe. Všetka komunikácia, ktorá sa odohráva v danej aplikácii pomocou MQTT protokolu, prechádza cez centrálny bod, ktorým je broker. Správy sa triedia na základe témy, t.j. topic, pričom každé zariadenie (klient) môže a nemusí na danú tému dáta publikovať (publish) alebo ich z nej odoberať (subscribe). Klient môže súčasne publikovať dáta na topic aj ich z neho prijímať, ak ich tam pošle niekto iný.



Obr. 2.19) Pub/Sub architektúra MQTT protokolu [61]

Témy a správy

Každá MQTT správa má priradenú práve 1 tému. Téma (topic) je hierarchický znakový reťazec, kde každá úroveň (level) je oddelený znakom lomítka „/“. Príklad témy, na ktorú by odosiela dáta senzor teploty v obývačke môže byť *home/groundfloor/livingroom/temperature*. Existujú však prípady, kedy klient potrebuje odoberať z niekoľkých tém alebo úrovní zároveň a v takom prípade môže použiť tzv. „wildcards“. Jednoúrovňová wildcard sa značí znamienkom „+“. Ak chce klient odoberať správy zo všetkých senzorov teploty v dome na prízemí, prihlási sa na odber témy *home/groundfloor+/temperature*. Viacúrovňová wildcard sa označuje symbolom „#“ a musí byť vždy na konci, pretože zahŕňa všetky témy, ktoré začínajú rovnakým reťazcom, ako je pred ním. Klient odoberajúci správy zo všetkých zariadení na prízemí domácnosti by sa v tomto prípade prihlásil na odber témy *home/groundfloor/#*. Výnimkou je názov témy, ktorá začína symbolom „\$“. Ide o témy rezervované pre interné účely brokera ako napríklad *\$/SYS/* alebo *\$/aws/* a iné.

Samotný obsah MQTT správ nie je pevne definovaný. Broker ich vidí iba ako binárne dáta, ktoré má preposlať ďalej. Na payload sa zvyčajne používa formát JSON (JavaScript Object Notation), textové správy ale kludne sa môže využiť aj formát definovaný používateľom. Dodržať treba len maximálnu veľkosť správy, ktorá nemôže prekročiť 256 MB, čo je podstatne viac, než je pre IoT aplikácie potrebné. [59]

Komunikácia

Nadviazanie komunikácie iniciuje klient, ktorý sa spojí s brokerom cez TCP. Najčastejšie sa pritom používa rezervovaný port 1883 alebo TCP/IP port 8883, ktorý je určený pre zabezpečenú komunikáciu využitím protokolov SSL (Secure Sockets Layer) alebo TLS.

Pre vývojára znamená implementácia MQTT protokolu do IoT aplikácie zvyčajne použiť už existujúce SW knižnice. Tie zabraňujú preposielanie packetov do funkcií na vyššej úrovni, a preto nie je nevyhnutné poznať presný formát MQTT packetov. Je ale dobré mať predstavu o tom, čo sa deje na nižšej úrovni komunikácie. Súčasťou každej správy sú MQTT control packets, ktoré možno pochopiť na príklade jednoduchej komunikácie:

Klient odosiela prvú správu s control packetom typu *CONNECT*, zvyčajne s príznakom clean session, čo zaisťuje, že neodberá zatiaľ žiadne témy. Súčasťou pripojenia môže ale nemusí byť overenie menom a heslom. Broker odpovedá control packetom *CONNACK*.

Nasledovať môže niekoľko správ *SUBSCRIBE* s témami, ktoré chce klient odoberať. Výhodou je, že nemusí poznať ostatných klientov, iba témy, na ktorých sa dohli, že budú komunikovať. Broker odpovedá správou s control packetom typu *SUBACK*.

Odosielanie správ zabezpečujú packety *PUBLISH*, ktoré môžu ale nemusia vyžadovať potvrdenie. Na odhlásenie odberu sa použije control packet typu *UNSUBSCRIBE*, potvrdený správou *UNSUBACK*, a komunikácia sa končí správou *DISCONNECT*. [59]

Quality of Service

MQTT protokol zavádza 3 úrovne potvrdenia príjmu správ medzi zariadeniami a brokerom, ktoré určuje QoS (Quality of Service).

- QoS 0 („at most once“) – je najnižšia úroveň, kedy je správa odoslaná ale nie je zaručené, že bola prijatá. Klientova správa *PUBLISH* je bez odpovede.
- QoS 1 („at least once“) – zabezpečuje, že správa bude doručená aspoň raz, ale môže sa doručiť aj viackrát. Odpoveď na správu *PUBLISH* nasleduje potvrdenie control packetom typu *PUBACK*, inak sa správa odošle znova.

- QoS 2 („exactly once“) – je najvyššia úroveň, správa je doručená práve 1 krát. Duplicita ani strata správy nie je povolená. Správu *PUBLISH* prepošle broker odoberateľom, ktorí potvrdia príjem publisherovi paketom *PUBREC*. Keď odosielateľ prijme potvrdenie o prijatí *PUBREC*, tak odošle správu *PUBREL*. Po prijatí paketu *PUBREL* príjemca oznámi odosielateľovi, že prenos je hotový paketom *PUBCOMP* a broker správu vymaže.

Je zrejmé, že tradeoff za vyššiu úroveň QoS je nižšia rýchlosť komunikácie.

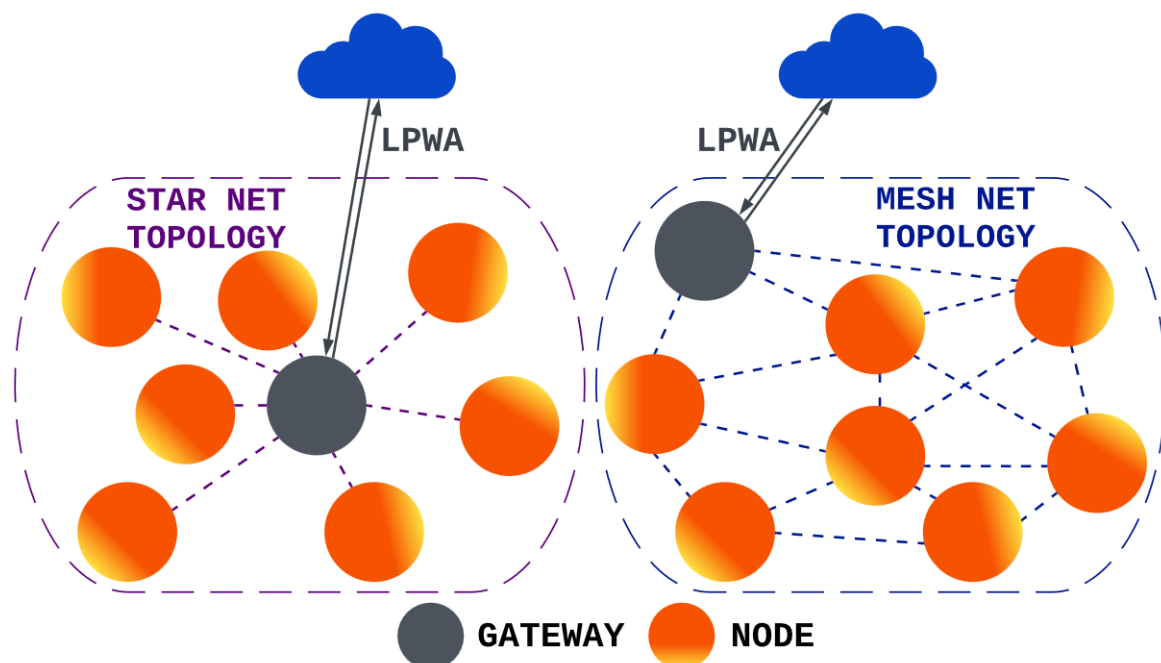
Broker

O príjem a preposielanie správ odoberajúcim klientom sa stará MQTT broker, bez ktorého nemôže komunikácia fungovať. Medzi najznámejších open source MQTT brokerov patrí Mosquitto, HiveMQ, EMQ, VerneMQ a iný, ale samozrejme broker je súčasťou aj komerčných cloudových IoT platforiem, ktoré MQTT implementujú ako AWS IoT Core, Azure IoT Hub alebo iné platformy spomínané v kapitole 2.3.1 Porovnanie IoT platforiem.

2.5 IoT mesh siete

Vo sfére IoT riešení s neustále rastúcim počtom pripojených zariadení sa snaha spojenia každého zariadenia priamo s cloudom ukázala ako nákladná a nie vždy efektívna. K dispozícii sú aj iné možnosti ako uľahčiť komunikáciu na menšie vzdialenosti. Práve tu prichádzajú do úvahy siete s topológiou typu mesh, ktoré sú v poslednej dobe obzvlášť populárne.

Siete typológie mesh sú lokálne bezdrôtové siete, ktoré umožňujú zariadeniam pripojiť sa a komunikovať medzi sebou v decentralizovanom systéme. Namiesto toho aby sa každé zariadenie pripájalo k jednému centrálnemu bodu, sú všetky uzly do istej vzdialenosti spojené navzájom. Potom stačí, aby jeden uzol siete mal pripojenie na cloud s využitím LPWA technológie a môže tak sprostredkovať komunikáciu všetkých zariadení z lokálnej siete na cloud alebo opačne, pričom ono samo funguje ako gateway na rozhraní 2 sietí. Zároveň ide o protokoly, na ktorých je veľmi často založená komunikácia rôznych spotrebiteľských a smart home zariadení.



Obr. 2.20) Hviezdicová topológia a mesh topológia siete (s pripojením na cloud z 1 uzla)

Takýto prístup má niekoľko benefitov. Na úrovni externej komunikácie s cloudom je to predovšetkým zníženie nákladov, ale ak sa porovnajú topológie typu mesh a hviezda na lokálnej úrovni, výhod je hneď niekoľko.

Prvou je spoľahlivosť. Keďže všetky uzly v okolí môžu prijímať a preposielať správy tomu zariadeniu, pre ktoré sú určené, výpadok alebo porucha niektorého zariadenia nemá zásadný vplyv na komunikáciu v sieti. Z pohľadu prenosu je to tiež konzistentnosť, pretože dáta môžu putovať niekoľkými rôznymi cestami od uzla A k uzlu B, a tiež väčší dosah, keďže uzol A nemusí mať priamy dosah na uzol B, lebo správu prepošlú zariadenia medzi nimi. Takýto proces sa nazýva routing a ide o hľadanie najefektívnejšej cesty pri komunikácii medzi 2 zariadeniami. Keďže existuje mnoho ciest, cez ktoré môžu byť dáta doručené, využívajú routing algoritmy optimalizačné funkcie pri ktorých berú do úvahy faktory ako sila signálu, vyťaženie a dostupnosť zariadení v sieti. Zároveň medzi ďalšie výhody patrí možnosť prenášať informácie simultánne. Pridávanie nových zariadení do mesh siete nemá negatívny vplyv na rýchlosť komunikácie a sieť s topológiou typu mesh možno dynamicky škálovať.

Ako pri ktorejkoľvek inej technológii, ani žiaden IoT mesh protokol nie je všemocný a to je dôvod, prečo ich existuje niekoľko. Protokoly Zigbee, Thread aj BLE mesh majú svoje výhody pri istých typoch aplikácií. Preto je dobré vedieť aspoň z relatívneho hľadiska porovnať ich spotrebu energie, priepustnosť (throughput), latenciu, bezpečnosť a možnosti škálovania.

Zigbee je z tejto skupiny najstarší a súčasne najviac vyvinutý mesh protokol, štandardizovaný v roku 2003. Postavený je na fyzickej a MAC (Media Access Control) vrstve štandardu IEEE 802.15.4, vďaka čomu okrem natívnej podpory mesh topológie ponúka automaticky aj zabezpečenie komunikácie. Keďže ide o otvorený štandard, operuje v nelicencovanom frekvenčnom pásme 868, 900 MHz a 2,4 GHz. Zigbee implementujú vo svojich ekosystémoch veľké spoločnosti ako Ikea, Amazon, Phillips, Samsung a ďalšie. Typický smart home systém založený na Zigbee sieti potrebuje 3 komponenty [62]:

- Zigbee Coordinator (ZC) – je typicky nejaký smart home kontrolér (bridge alebo gateway), ktorého úlohou je nastaviť sieť, pridávať do nej nové zariadenia a zabezpečiť ich vzájomnú komunikáciu. V sieti je iba jeden koordinátor a musí byť stále zapnutý.
- Zigbee Router (ZR) – routery sú tiež neustále napájané elektrickou energiou a priamo zabezpečujú routing. V sieti môže byť viacero routerov a najčastejšie sú to smart zariadenia ako žiarovky, vypínače alebo akékoľvek spotrebiče, ktoré sú spravidla napájané striedavým prúdom.
- Zigbee End Devices (ZED) – sú najjednoduchšie zariadenia v sieti, ktoré iba posielajú alebo prijímajú dáta. Zvyčajne sú napájané z batérií a môžu to byť rôzne senzory teploty, pohybu, CO₂ a podobne.

Thread má podobnú architektúru ako Zigbee a predstavený bol v roku 2015. Tiež využíva routing uzly, ktoré zabezpečujú efektívny spôsob prenosu dát, pretože routery majú plne pod kontrolou komunikáciu medzi koncovými uzlami a zvyšujú tak throughput siete. Thread je postavený na rovnakom štandarde fyzickej a MAC vrstvy, so 127 bajtovými packetmi a data rate 250 kb/s. Rozdiel je v samotnej štruktúre packetov. Zigbee packet má payload veľkosti 68 bajtov, Thread 63 bajtov. Protokol Thread podporujú zariadenia ako Google Nest alebo Apple HomePod.

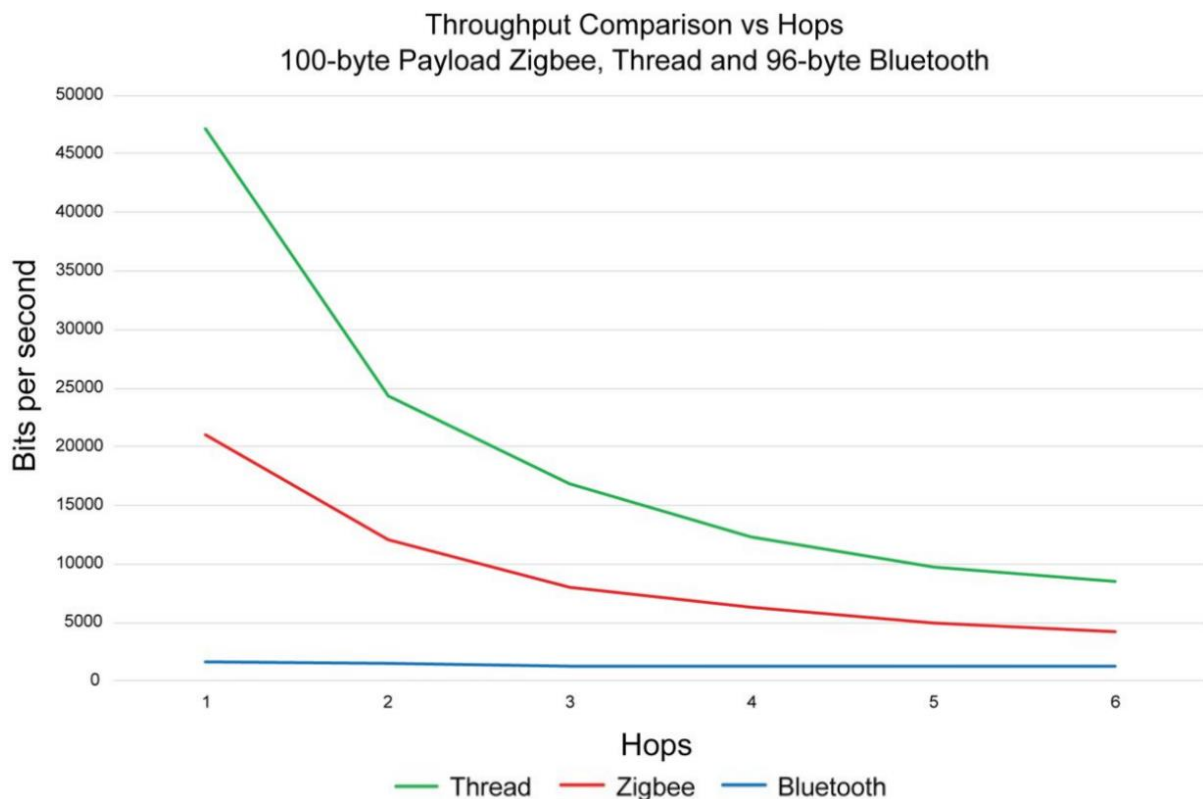
BLE (Bluetooth Low Energy) **mesh** štandardizovala organizácia Bluetooth SIG (Special Interest Group) až v roku 2017. Na rozdiel od predošlých protokolov ide o full-stack riešenie, ktoré je postavené na BLE stacku, čo znamená že používa aj rovnakú fyzickú vrstvu.

Vďaka tomu, že väčšina smartfónov, tabletov a iných zariadení má vstavané BLE čipy, stačil iba SW update, aby aj ony mohli podporovať BLE mesh. Bežný smartfón s Bluetooth 4.0 a novším môže tak monitorovať pripojené uzly v mesh sieti, zatiaľ čo pri Zigbee alebo Thread by bol potrebný externý modul.

Ďalší významný rozdiel je v samotnej komunikácii. BLE mesh nepotrebuje routery na preposielanie správ, pretože používa „managed flooding“. Flooding je v jednoduchosti metóda prenosu dát, kedy všetky uzly mesh siete posielajú data-pakety ďalej, bez výberu optimálnej cesty. Táto metóda je užitočná v prípadoch, kedy poloha príjemcu je neznáma alebo keď sa uzly rýchlo pripájajú a odpájajú zo siete. Problém nastáva pri väčších sieťach, kde je takýto prístup veľmi neefektívny, pretože spôsobuje preťaženie siete a zbytočné plytvanie energiou zariadení.

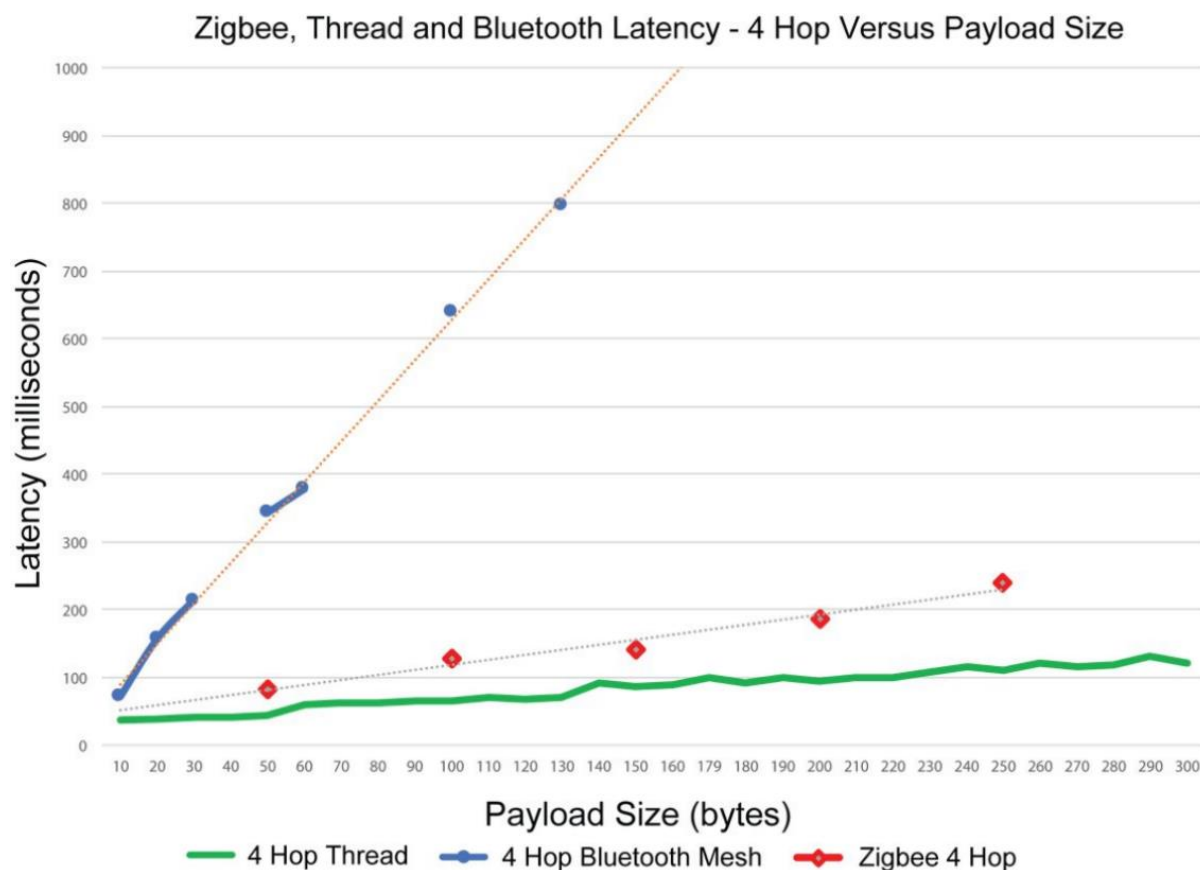
Z hľadiska štruktúry má BLE mesh packet veľkosť payloadu 12 alebo 16 bajtov, pričom pakety sa segmentujú na menšie časti a až príjemca si ich skladá do kopy. Už samotný prístup naznačuje, že sa tým zvyšuje latencia a znižuje priepustnosť protokolu. [63]

Prenos informácie z jedného uzla na druhý sa označuje ako 1 preposlanie alebo „hop“, pričom v typickej mesh sieti nastanú počas prenosu informácie 2 až 4 preposlania. Porovnanie spomenutých mesh sietí v skutočných podmienkach realizovala spoločnosť Silicon Labs v [64]. V rámci svojich testov spravili niekoľko meraní ako napríklad závislosť throughput na počte preposlaní pri veľkosti payloadu 100 bajtov. Okrem toho, že throughput je pochopiteľne závislý na počte preposlaní, ukazuje graf na obrázku Obr. 2.21 tiež, že BLE mesh má jednoznačne najmenšiu priepustnosť, čo je spôsobené malou veľkosťou payloadu v každom packete. Throughput všetkých sietí začína byť ale celkom podobný, ak sa zvyšuje počet uzlov, cez ktoré sa správa prenáša.



Obr. 2.21) Throughput v závislosti od počtu preposlaní (payload 100 bajtov) [64]

Na grafe v Obr. 2.22 je zobrazený výsledok merania latencie v závislosti od veľkosti payloadu, každá správa má 4 preposlania. Parametre sietí sú tentoraz podobné v prípade, že je payload malý, avšak rozdiely sú výraznejšie, keď sa payload zväčšuje. Thread dosahuje najnižšiu latenciu na úrovni asi do 150 ms pri 4 preposlaniach, avšak Zigbee nie je na tom výrazne horšie. Najväčšiu latenciu má v každom prípade BLE mesh, kde opäť vidno výrazný problém spôsobený segmentáciou packetov s väčšou veľkosťou payloadu.



Obr. 2.22) Latencia v závislosti od veľkosti payload (4 preposlania) [64]

Výsledky porovnania parametrov jednotlivých protokolov možno zhrnúť do pár bodov:

- Thread, Zigbee aj BLE mesh majú podobné parametre, ak sa použijú v malých sieťach, kde sa posielajú malé payloady.
- BLE mesh nestačí na Thread a Zigbee v prípadoch, kde sa posielajú veľký payload alebo tam, kde je potrebný vysoký throughput.
- Vo všetkých 3 prípadoch sa latencia zvyšuje priamo úmerne s rastúcim počtom uzlov v sieti, avšak nárast najviac ovplyvňuje BLE mesh.
- BLE mesh funguje optimálne ak sa posielajú správy s malým payloadom (do 12 bajtov) a hlavne pre multicast⁷ správy.

Na záver však treba zdôrazniť, že veľmi dôležitú rolu hrajú dostupné vývojárske nástroje, nielen z hľadiska HW (podpora na strane MCU) ale aj SW (knihnice, dokumentácia), pretože to vo výsledku rozhoduje o tom, ktorý protokol je použiteľný na akej platforme a tiež, ako rýchla a komplikovaná bude jeho implementácia v danej aplikácii.

⁷ Multicast – dáta sa posielajú skupine prijímateľov. Opakom je unicast – správa pre 1 prijímateľa.

3 Definícia úlohy

Pred pokračovaním v praktickej časti je dôležité definovať samotnú úlohu a účel diplomovej práce. Explicitná definícia cieľov v skorej fáze akéhokoľvek projektu, uľahčuje nielen odhad jeho rozsahu, ale aj zložitosti.

Táto kapitola sa snaží bližšie definovať úlohu a jej ciele, ktoré budú v ďalšej časti konkrétne špecifikované, vypracované a prakticky otestované. Zároveň je dôležité povedať, že nakoľko sa jedná o akademickú prácu, boli požiadavky úlohy definované tak, aby vyhovovali obmedzeným prostriedkom a vymedzenému časovému intervalu, ktorý je k dispozícii na jej vypracovanie.

3.1 Ciele práce

Jednotlivé ciele diplomovej práce boli stanovené nasledovne:

- Zoznámenie sa s technológiou NB-IoT siete a rešerš porovnateľných IoT technológií s dôrazom na praktickú použiteľnosť.
- Popis procesu nasadenia technológie v komerčnom prostredí.
- Návrh technologického demonštrátora na overenie podstatných funkcií siete, ktorý bude obsahovať NB-IoT koncentrátor, cloudovú službu a vstupné senzorické uzly.

Snahou v ďalšej časti práce je navrhnuť **demonštratívnu aplikáciu**, v rámci ktorej budú **senzorické uzly** snímať konkrétne fyzikálne veličiny reálneho systému a preposielať dáta koncentrátoru. **Koncentrátor** bude dedikované zariadenie, ktoré zozbiera informácie zo senzorov a zabezpečí ich prenos na **cloudovú platformu** pomocou technológie **NB-IoT**.

Zároveň by bolo užitočné, keby výsledné riešenie neslúži iba ako demonštrácia technológie NB-IoT, ale ideálne pomôže tiež s riešením ucelenej aplikácie. Okrem toho môže byť nepriamym cieľom spracovania diplomovej práce aj možnosť zoznámiť sa s novými platformami, frameworkmi alebo programovacími jazykmi, ktoré nemusia byť nevyhnutne optimálnou voľbou pre účely riešenia daného problému, poskytnú však autorovi vzácnu skúsenosť s jemu dovtedy neznámymi nástrojmi.

3.2 Koncept spracovania úlohy

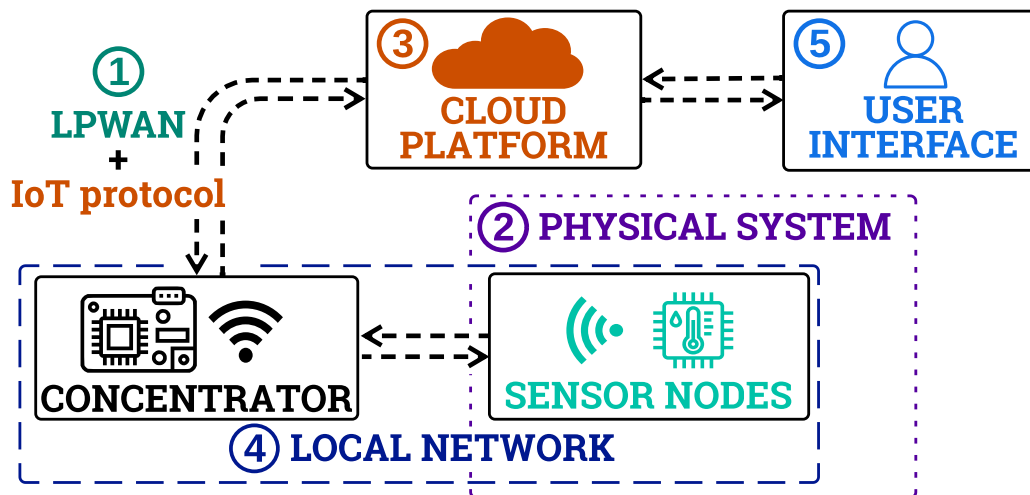
Predošlá časť tejto práce poskytuje teoretický úvod do obsiahlej problematiky IoT riešení, ktoré využívajú komunikáciu založenú na technológii s rádiovým (RF) prenosom. V tejto fáze práce je vhodné načrtnúť prvotný koncept spracovania danej úlohy a mať už základnú predstavu o tom, čo bude potrebné na jej realizáciu.

Pri pohľade na stanovené ciele z praktického hľadiska je zrejmé, že v prvom kroku bude dôležité zoznámiť sa s cloudovými platformami a ich službami, pohladať kompatibilné vývojové sady, zaobstaráť komunikačný RF modul a vybrať vhodné senzory na základe konkrétnej aplikácie. Následne sa zamyslieť nad spôsobom lokálnej komunikácie medzi senzorickými uzlami a koncentrátorom, a až potom sa pustiť do hlavnej časti práce. Tou bude písanie firmwaru pre zvolené embedded zariadenia, využitím niektorého z nízkoúrovňových programovacích jazykov, akými sú C alebo C++.

Zároveň je nevyhnutné počítať s tým, že ako bude práca na projekte postupovať, takmer s istotou sa objavia aj nečakané problémy alebo pribudnú nové požiadavky, ktoré bude potrebné implementovať. Už teraz možno predpokladať, že hoci nejde o explicitne stanovený

cieľ v zadaní, bolo by vhodné merané dáta nielen zbierať v cloude ale aj ich nejakým spôsobom vizualizovať, prípadne poskytnúť používateľovi možnosť nastavovať vybrané parametre systému na diaľku. Takéto rozšírenie pomôže lepšie demonštrovať nasadenie technológie NB-IoT ako súčasť komplexnej IoT aplikácie, aj keď v tomto prípade je primárny cieľ demonštrácia funkčnosti samotnej technológie a nie vyhodnocovanie nameraných hodnôt z pohľadu danej aplikácie.

Diagram na obrázku Obr. 3.1 znázorňuje zatiaľ iba všeobecný koncept spracovania danej úlohy. Pokúša sa však naznačiť, akým spôsobom budú v praktickej časti diplomovej práce zakomponované technológie, ktoré boli spomenuté v rešerši.



Obr. 3.1) Koncept spracovania úlohy

Realizácia úlohy je rozložená do 5 kľúčových bodov. Nie všetky sú definované priamo v zadaní, a preto budú bližšie špecifikované až na základe systému, ktorý bude zvolený na demonštráciu aplikácie NB-IoT technológie.

Definované:

1) LPWAN – Vzhľadom k téme diplomovej práce je už teraz zrejme, že spomedzi dostupných LPWA sietí bude komunikáciu s cloudom sprostredkovať technológia **NB-IoT**. V prvom kroku bude preto potrebné predplatiť tarifu od Vodafone a získať prístup do siete.

Zatiaľ nešpecifikované:

2) Technologický demonštrátor – Prioritou bude zvoliť vhodný fyzický systém, na ktorom sa budú merať jeho parametre a vybrané fyzikálne veličiny. Výber senzorov a voľba protokolu mesh siete pre lokálnu komunikáciu bude závisieť na danom systéme.

3) Cloudová platforma a komunikačný protokol – Veľmi dôležitá bude i voľba cloudovej platformy, pretože s tým súvisí komunikačný protokol a nepriamo aj potrebný RF modul.

4) Lokálna sieť, HW a SW komponenty – V rámci lokálnej siete bude prebiehať komunikácia medzi NB-IoT koncentrátorom a senzorickými uzlami. Koncentrátor bude z hľadiska HW obsahovať RF modul a riadiaci mikrokontrolér, ktorý bude podporovať niektorú z IoT technológií na lokálnu komunikáciu. Podobný alebo rovnaký kontrolér budú mať aj senzorické uzly, ale namiesto RF modulu budú vybavené jednotlivými senzormi.

5) Používateľské rozhranie – Rozhranie bude zobrazovať aktuálne hodnoty senzorov, prípadne poskytne používateľovi možnosť priamo ovládať niektoré nastavenia systému.

4 Vlastná špecifikácia úlohy

Na základe poznatkov z rešeršnej časti bude v tejto kapitole bližšie špecifikované vlastné riešenie úlohy, fyzický systém – technologický demonštrátor a ostatné kľúčové body, potrebné pre aplikáciu NB-IoT technológie.

4.1 Technologický demonštrátor

Technologický demonštrátor, ktorý bude slúžiť na overenie funkčnosti celého riešenia, by mal:

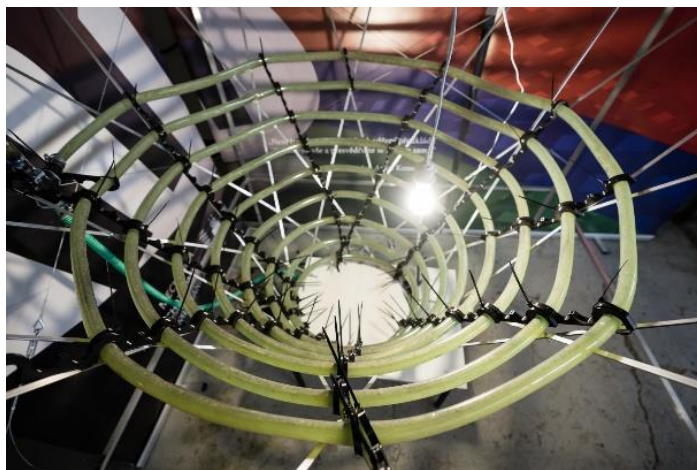
- Umožniť monitorovanie vybraných parametrov pomocou elektronických senzorov.
- Poskytnúť možnosť lokálnej komunikácie využitím IoT siete s mesh topológiou.
- Benefitovať z nasadenia NB-IoT technológie na komunikáciu s cloudovou platformou.

S ohľadom na tieto kritériá bolo rozhodnuté, že nasadenie NB-IoT technológie sa bude demonštrovať na aplikácii, ktorá monitoruje relevantné parametre **fotobioreaktora (PBR)** v laboratórnych podmienkach.

4.1.1 Fotobioreaktor

PBR slúži na pestovanie mikrorias, ktoré sú podobne ako iné rastliny, schopné oxygénnej fotosyntézy, počas ktorej premieňajú oxid uhličitý, vodu a svetelnú energiu na kyslík a chemickú formu energie, ktorú ukladajú v biomase. [65]

Z mechanického hľadiska je trubkový PBR uzavretý systém, ktorý tvorí vodná nádrž a pospájané priehľadné trubky poskladané v rôznych tvaroch tak, aby sa optimalizovalo využitie dopadajúceho svetla. Nádrž na pestovanie mikrorias spája s trubkami vodné čerpadlo, ktoré zabezpečuje cirkuláciu média v systéme. Ďalej sa tu nachádza čerpadlo na rozhraní vzduch/voda, ktoré zabezpečuje prísun oxidu uhličitého z okolitého vzduchu a jeho miešanie s pestovaným médiom. Príklad trubkového PBR je na obrázku Obr. 4.1 a zjednodušená schéma na Obr. 4.2.



Obr. 4.1) Trubkový fotobioreaktor Simbios [66]

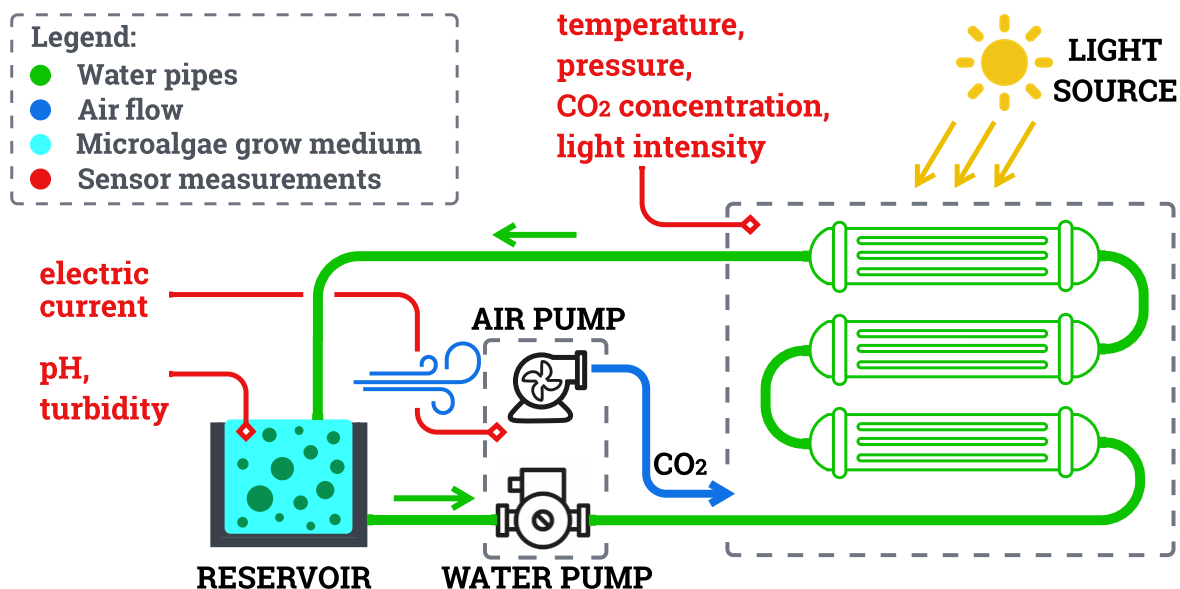
V posledných rokoch sa vývoj v tejto oblasti sústredil na automatické fotobioreaktory, ktoré možno prevádzkovať bez potreby ľudského zásahu. V kontexte riešenia problémov spojených s globálnym otepľovaním zároveň vzniká rastúci dopyt po ich širšom nasadení a to aj v regiónoch bez konvenčných možností pripojenia k internetu. Riešenie by tak mohli poskytnúť práve LPWAN technológie.

4.1.2 Monitorovanie systému

Aby mohol PBR fungovať v automatizovanom režime, je potrebné snímať niekoľko jeho parametrov, pomocou ktorých vykonáva riadiaci systém akčné zásahy a optimalizuje premenu oxidu uhličitého. Samotné riadenie systému prebieha na lokálnej úrovni, pričom základné parametre sú aj tak reportované na cloud, kde má k nim prístup správca systému. Ak by bola komunikácia však dostatočne spoľahlivá a efektívna, celý riadiaci proces by sa v budúcnosti mohol teoreticky vykonávať priamo v cloude s odosielaním akčných zásahov priamo odtiaľ, a to aj pre viacero fotobioreaktorov naraz.

Z hľadiska monitorovania parametrov PBR, ktoré sa budú preposielať na cloud, bude potrebné zaobstarať 6 senzorov snímajúcich nasledujúce veličiny:

- 1) **Teplota + tlak**
- 2) **Intenzita osvetlenia**
- 3) **Koncentrácia CO₂**
- 4) **pH kvapaliny**
- 5) **Zákal**
- 6) **Elektrický prúd**



Obr. 4.2) Schéma fotobioreaktora

PBR zároveň predstavuje vhodný fyzický systém pre aplikáciu mesh siete na lokálnu komunikáciu, keďže jednotlivé senzory sú od seba pomerne vzdialené a použitie káblov by bolo v takom prípade nepraktické. Zároveň sú ale dostatočne blízko na to, aby si mohli medzi sebou vymieňať informácie. Koncentrátor bude jediný uzol siete, ktorý bude vybavený RF modulom, a teda schopný odosielať dáta na cloud a zároveň ich z neho prijímať s využitím technológie NB-IoT.





4.2 Cloudová platforma a komunikačný protokol

V kapitole 2.3 boli porovnané cloudové IoT platformy. Počas skúmania možností pre účely tejto práce boli prakticky otestované platformy Azure, ThingSpeak, Tago IO či Cayenne IoT, ale v prípade tejto aplikácie bola vybraná **Amazon Web Services**. Okrem širokého spektra služieb, ktoré AWS platforma obsahuje, je jej pridaná hodnota aj to, že sa veľmi často používa v komerčnom prostredí, a preto môže byť skúsenosť s ňou užitočná aj do budúcnosti.

4.2.1 Amazon Web Services

AWS poskytuje ročný free tier, vďaka čomu je platforma ľahko dostupná aj pre nových používateľov. Z dostupných AWS služieb budú primárne využité len niektoré, ktorých free tier limity sú zobrazené v tabuľke Tab. 4.1.

Tab. 4.1) AWS Free Tier limity [67]

| Service | AWS Free Tier limits |
|---|---|
|  AWS IoT Core | 500 000 Messages per month (published or delivered) |
|  Amazon Simple Storage Service | 5 GB Storage 20 000 GET Requests 2 000 PUT Requests |
|  AWS Lambda | 1 Million Requests per month |
|  AWS API Gateway | 1 Million API Calls Received per month |

S ohľadom na aplikáciu možno predpokladať, že pri správnom SW návrhu bude mesačne použitý iba zlomok dostupných zdrojov z predplatného AWS Free Tier.

4.2.2 IoT protokol MQTT

Pri voľbe komunikačného protokolu pre IoT aplikáciu nie je na výber veľa možností. NB-IoT komunikácia s cloudom bude postavená na protokole **MQTT**, ktorý je v porovnaní s HTTP vhodnejší a efektívnejší pre potreby IoT. MQTT broker je súčasťou služby AWS IoT Core.

4.3 Lokálna sieť, HW a SW komponenty

Rýchlosť prenosu dát na monitorovane parametrov PBR a komunikáciu medzi koncentrátorom a senzorickými uzlami nehrá kriticky dôležitú rolu. Pri výbere komunikačného protokolu pre lokálnu IoT sieť bola preto snaha sústrediť sa na cenu a dostupnosť z hľadiska HW podpory. So zreteľom na tieto požiadavky bol pred Zigbee a Thread uprednostnený protokol **BLE mesh**.

4.3.1 BLE mesh a vývojová platforma ESP

BLE mesh má relatívne širokú podporu medzi výrobcami vývojových platforiem. Moduly **ESP32** od Espressif sú ľahko dostupné a vďaka výbornému pomeru cena/výkon sú často používané práve pre účely menších projektov. Výrobca ponúka rôzne rady modulov s podporou BLE mesh, ktoré by mohli byť vhodné aj pre túto aplikáciu, minimálne na obsluhu senzorov.

V tom prípade senzorických uzlov budú mať 2 hlavné účely, vyčítať dáta z daného senzora a zabezpečiť komunikáciu s koncentrátorom.

Pri koncentrátore bude výber riadiaceho mikrokontroléra/modulu záležať na voľbe RF modulu, pretože z hľadiska HW je k dispozícii niekoľko variant. Buď možno využiť celú vývojovú sadu, tzv. development kit s integrovaným mikrokontrolérom, RF modulom a BLE mesh modulom alebo skombinovať samostatný RF modul a nezávislý riadiaci mikrokontrolér.

SW nástroje, knižnice a frameworky budú bližšie špecifikované na základe výberu konkrétnych mikrokontrolérov, modulov a ostatných HW komponentov.

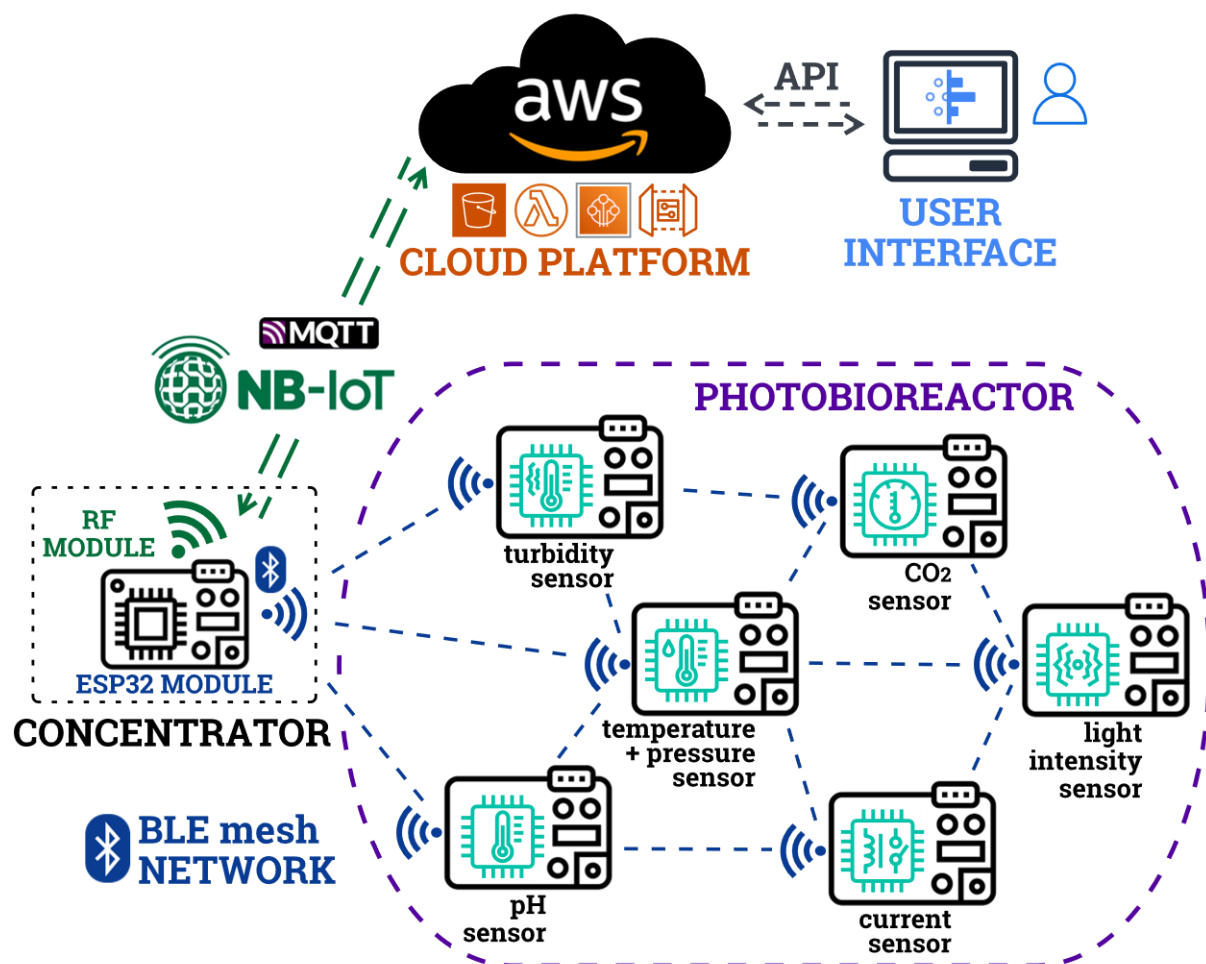
4.4 Používateľské rozhranie

Bolo by vhodné, ak by súčasťou riešenia bolo aspoň jednoduché používateľské rozhranie, ktoré by zobrazovalo real-time hodnoty zo senzorov, prípadne umožnilo na diaľku odosielať informácie systému, čím by sa overila aj downlink funkcionálnosť siete NB-IoT.

Na tvorbu používateľského rozhrania môžu byť priamo použité nástroje a služby platformy AWS alebo riešenia tretích strán, čo by prácu značne uľahčilo. Zároveň je tu variant vlastnej implementácie webového rozhrania, ktorý ponúka väčšiu mieru kontroly.

4.5 Architektúra systému

V nadväznosti na kapitolu 3.2 Koncept spracovania úlohy, možno teraz načrtnúť už konkrétnu „architektúru“ špecifikovaného systému. Diagram na obrázku Obr. 4.3 zobrazuje ako budú prepojené časti demonštratívnej NB-IoT aplikácie a kde budú použité jednotlivé technológie.



Obr. 4.3) Architektúra systému pre aplikáciu NB-IoT

5 Hardware


Pri výbere hardware (HW) komponentov pre danú aplikáciu je potrebné vyriešiť nasledujúce úlohy: zvoliť riadiaci mikrokontrolér, zabezpečiť konektivitu s podporou BLE mesh a najšť vhodný rádiový modul, ktorý umožní komunikáciu na lokálnych frekvenčných pásmach NB-IoT.

Bezdrôtová komunikácia na lokálnej úrovni uľahčí škálovateľnosť aplikácie a poskytne nezávislosť na počte vstupných a výstupných pinov mikrokontroléra. Situáciu ohľadom HW zjednodušuje fakt, že fotobioreaktor v laboratórnych podmienkach poskytuje priamy prístup k napájaniu zo siete. V rámci technologického demonštrátora nebude potrebné riešiť problémy spojené s napájaním z batériových akumulátorov ani vplyvmi vonkajšieho prostredia na HW.

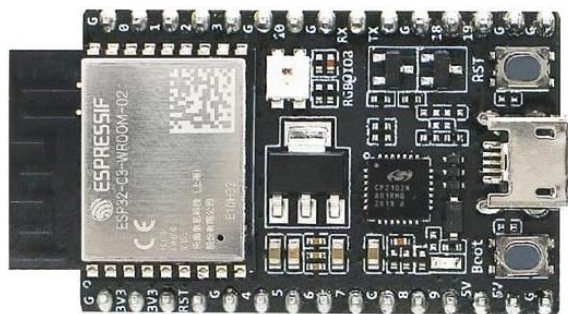
5.1 Riadiaci modul

Pre aplikáciu bol zvolený modul ESP32-C3-WROOM-02, ktorý rieši 2 požiadavky zároveň. Nejedná sa totiž iba o mikrokontrolér ale celý modul, pretože zhŕňa ESP32-C3 SoC (System on Chip) s podporou Bluetooth 5, vrátane PCB antény. Samotný procesor je postavený na otvorenom štandarde inštrukčnej sady RISC-V doplnený veľkou, až 4 MB flash pamäťou. Nižšie sú uvedené niektoré parametre a periférie modulu [68]:

Tab. 5.1) Parametre modulu ESP32-C3-WROOM-02

| | |
|---|---|
|  | 32-bit RISC-V single-core microprocessor – 160 MHz |
| | SPI Flash memory – 4 MB |
| | 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth 5 module |
| | On-board PCB antenna |
| | 3 × SPI, 2 × UART, 1 × I2C, 1 × I2S, 2 × 12-bit SAR ADCs, 19 GPIOs, Full-speed USB Serial/JTAG controller |
| ESP32-C3-WROOM-02 | 18 × 20 × 3,2 mm |

Cena modulu je v čase písania tejto práce (apríl 2023) necelých 50 Kč. Výrobca Espressif ponúka modul aj priamo ako súčasť vývojovej dosky ESP32-C3-DevKitC-02, ktorá je vybavená regulátorom napätia s nízkym úbytkom (LDO), RGB LED diódou, USB/UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) prevodníkom, má vyvedených 30 pinov a micro-B konektor pre napájanie a komunikáciu cez USB protokol. Cena jednej dosky je len 200 Kč.




Obr. 5.1) Vývojová doska ESP32-C3-DevKitC-02 [69]

5.2 RF modul

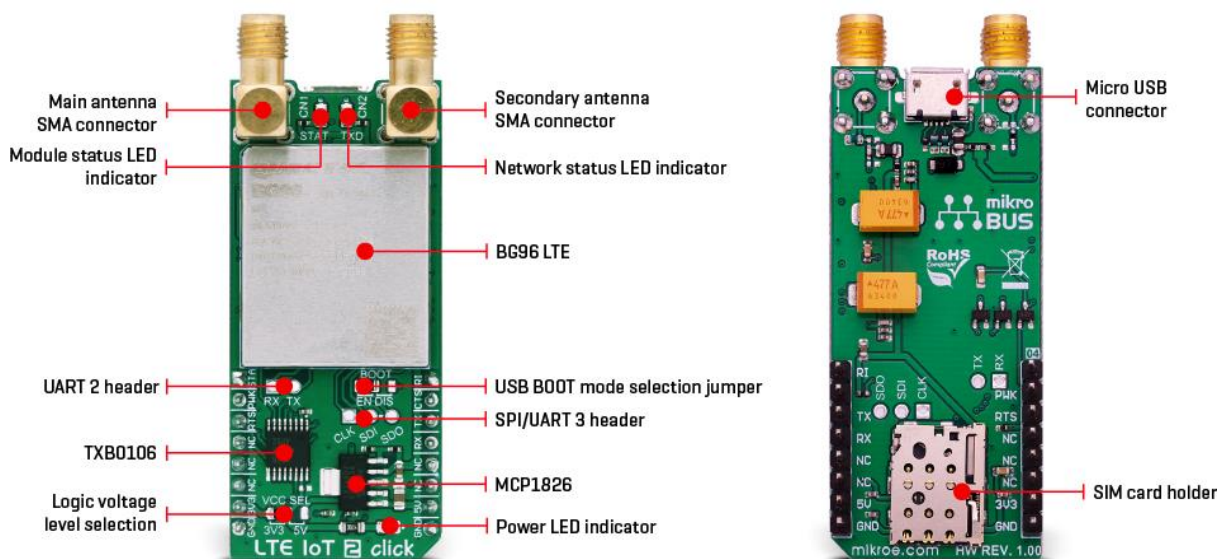
Na zabezpečenie komunikácie cez NB-IoT sieť je potrebné vybrať kompatibilný RF modul. Pri výbere je potrebné myslieť nielen na to, aby bol schopný komunikovať na lokálnych frekvenciách NB-IoT siete, ale tiež aby podporoval potrebné bezpečnostné protokoly na komunikáciu s vybranou cloudovou platformou. Najjednoduchší spôsob ako sa uistiť, že vybraný modul bude spĺňať tieto podmienky, je použiť niektorý z katalógu podporovaných zariadení od AWS dostupných na [70].

Z vyfiltrovaných modulov, ktoré podporujú NB-IoT, bol s ohľadom na dostupnosť a cenu vybraný Quectel BG96 LTE. Cena samotného modulu je asi 750 Kč. Nižšie sú uvedené niektoré jeho parametre [71]:

Tab. 5.2) Parametre modulu Quectel BG96 LTE

| | | |
|--|----------------|--|
|  | Supports: | LTE Cat M1 / Cat NB1 / EGPRS |
| | Protocols: | PPP / TCP / UDP / SSL / TLS / FTP(S) / HTTP(S) / NITZ / PING / MQTT |
| | Data: | Cat M1: Max. 375 kb/s (DL), Max. 375 kb/s (UL) Cat NB1: Max. 32 kb/s (DL), Max. 70 kb/s (UL) EDGE: Max. 296 kb/s (DL), Max. 236,8 kb/s (UL) GPRS: Max. 107 kb/s (DL), Max. 85,6 kb/s (UL) |
| | Controlled by: | Enhanced AT commands |
| | Dimensions: | 26,5 × 22,5 × 2,3 mm |
| | Temperature: | -40 ÷ 85 °C |

Zohnať tento modul ako súčasť vývojovej sady však nebolo možné. Z toho dôvodu bola zakúpená doska LTE IoT 2 click od spoločnosti Mikro (Obr. 5.2), ktorá je osadená modulom Quectel BG96, SMA konektormi na pripojenie antén, držiakom SIM karty, rieši napájanie aj vyvedenie potrebných pinov komunikačných rozhraní (USB a UART), ale neobsahuje riadiaci mikrokontrolér. LTE IoT 2 click možno kúpiť približne za 2000 Kč bez DPH.



Obr. 5.2) LTE IoT 2 click [72]

5.3 NB-IoT koncentrátor

Aby mohol NB-IoT koncentrátor fungovať ako nezávislé zariadenie, musí obsahovať vybraný riadiaci modul ESP32-C3-WROOM-02 a RF modul Quectel BG96.

Prepojenie dosky ESP32-C3-DevKitC-02, ktorá sa použije pre senzorické uzly, s dosku LTE IoT 2 click na nespájkovateľnom poli (breadboard) je rýchle a jednoduché riešenie počas vývoja, ale z praktického hľadiska nie príliš vhodné. Kým pri senzorických uzloch budú stačiť 3-4 káblíky, v tomto prípade je to komplikovanejšie. Pri danej aplikácii bolo rozhodnuté, že pre NB-IoT koncentrátor bude použité elegantnejšie riešenie zahŕňajúce návrh vlastnej DPS.

5.3.1 Návrh dosky plošných spojov

Koncept DPS pre koncentrátor je nasledovný:

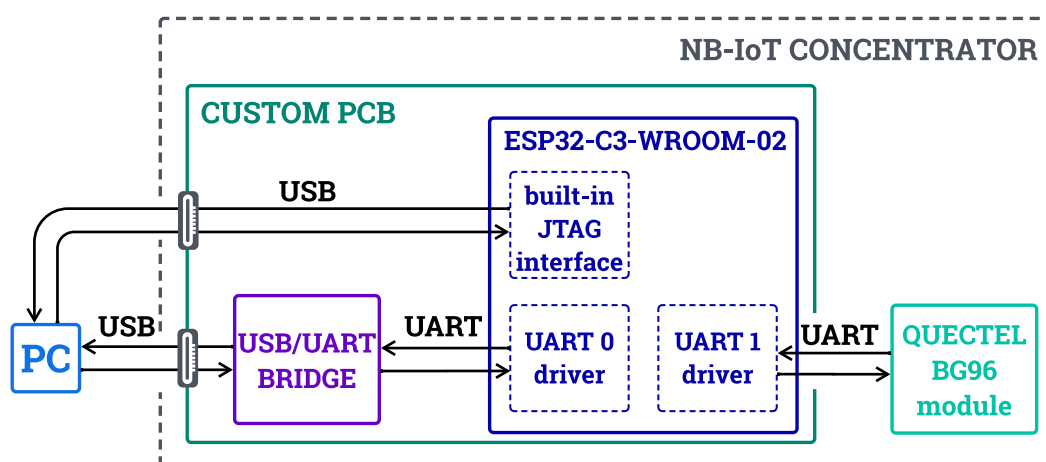
- Riadiaci modul ESP32-C3-WROOM-02 sa osadí priamo na DPS.
- Doska s RF modulom LTE IoT 2 click sa pripojí cez „header“ piny, podobne ako sa nasúvajú „shield“ dosky.

Návrh vlastnej DPS bude do veľkej miery inšpirovaný vývojovou sadou ESP32-C3-DevKitC-02, akurát bude dôležité prepojiť požadované signály medzi modulmi.

Na návrh dosky bude použitý open-source SW KiCad 6.0, ktorý zahŕňa nástroje umožňujúce okrem iného kresliť schémy zapojenia, navrhnuť vlastné symboly, routovať plošné spoje aj automaticky generovať zoznam potrebných súčiastok.

Na účely komunikácie bude mať doska 2 USB konektory. Vzhľadom k tomu, že rada ESP32-C3 modulov podporuje aj USB rozhranie, bude jeden pripojený priamo na USB piny. Veľkou výhodou je, že vďaka tomu sa dá využiť vstavané JTAG (Joint Test Action Group) rozhranie a debugovať kód bez potreby akéhokoľvek ďalšieho HW ako napríklad nástrojov ESP-Prog alebo Segger J-Link, ktoré sa zvyčajne používajú na debugovanie cez JTAG. Druhý konektor bude pripojený na USB/UART prevodník.

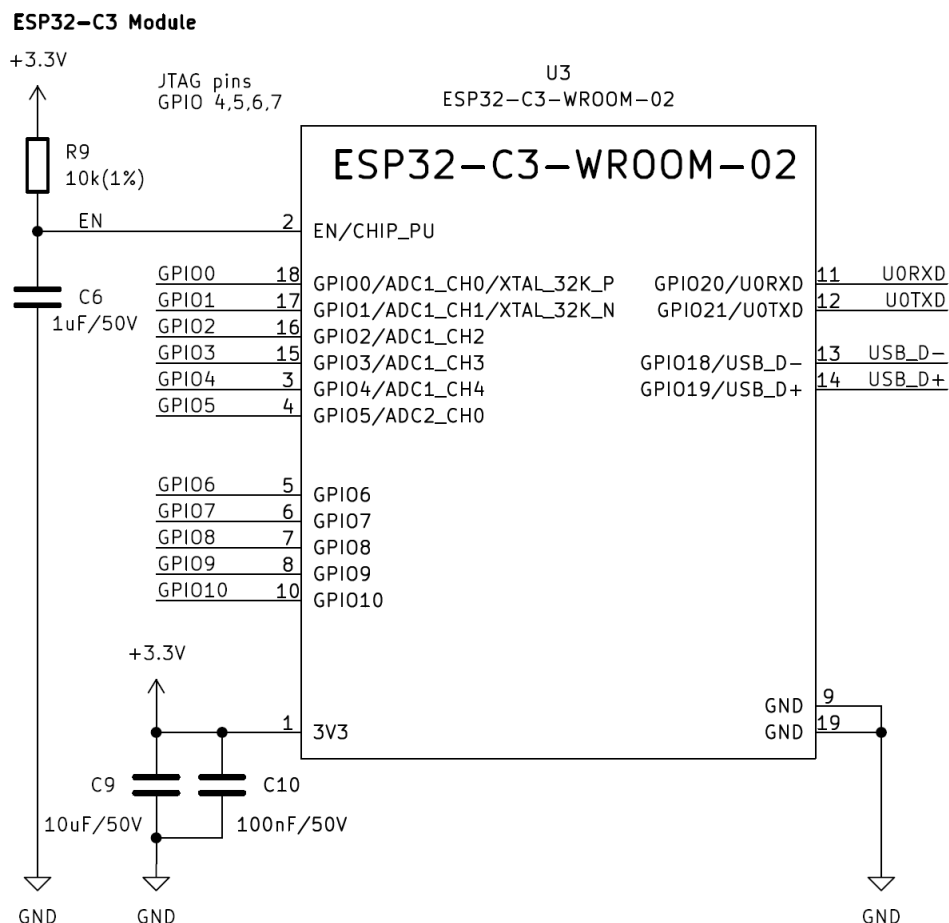
Na komunikáciu medzi riadiacim modulom a RF modulom bude najľahšie použiť tiež UART. Pre lepšiu názornosť sú použité komunikačné rozhrania zobrazené na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5.3) Fyzická vrstva komunikačných rozhraní NB-IoT koncentrátoru

Schéma zapojenia

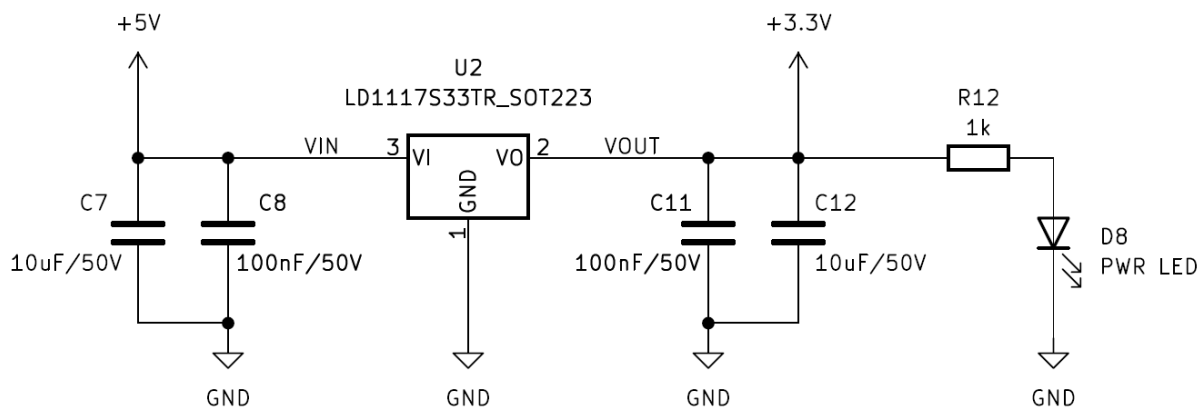
ESP modul je osadený podľa odporúčaní výrobcu z datasheetu [68]. Napájanie zabezpečuje napätová vetva 3,3 V napojená cez „decoupling“ kondenzátory C9 a C10, ktoré udržuju žiadané napätie a v prípade potreby sú schopné dodať rýchle prúdové špičky. Menovité napätia použitých kondenzátorov sú zbytočne vysoké, ale dôvod ich použitia je, že boli k dispozícii a na funkcionlitu obvodu to nemá zásadný vplyv. Schéma zapojenia modulu je na Obr. 5.4.



Obr. 5.4) Schéma zapojenia modulu ESP32-C3-WROOM-02

Stabilnú napätovú úroveň 3,3 V udrhuje LDO (Low Drop-Out) regulátor napätia LD1117 doplnený indikačnou LED diódou D8 a decoupling kondenzátormi na vstupnej (C7, C8) aj výstupnej strane (C11, C12). Schému vidno na Obr. 5.5.

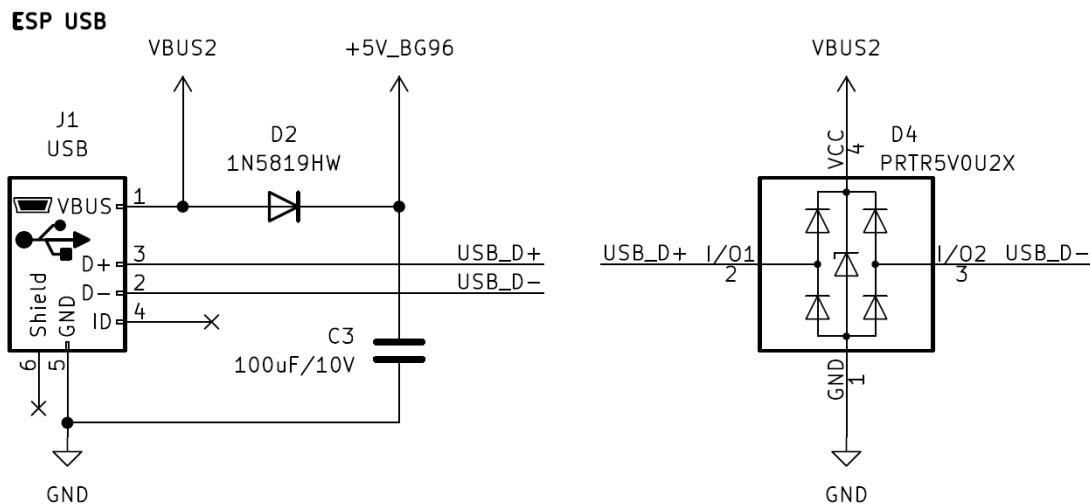
Power supply



Obr. 5.5) Schéma zapojenia LDO regulátora

Ako zobrazuje obrázok Obr. 5.3, na fyzické pripojenie k doske sú použité 2 USB micro-B konektory J1 a J2. Prvý je napojený na diferenciálny pár dátových liniek USB rozhrania mikrokontroléra, USB_D+ a USB_D-. Schéma jeho zapojenia je na obrázku Obr. 5.6.

Druhý konektor slúži na pripojenie k sériovému prevodníku a jeho zapojenie je veľmi podobné (Obr. 5.7).



Obr. 5.6) Schéma zapojenia USB konektora na pripojenie k USB rozhraniu mikrokontroléra

V oboch prípadoch je vonkajšie napájacie napätie, ktoré sa pripája cez konektory, označené ako VBUS, resp. VBUS2.

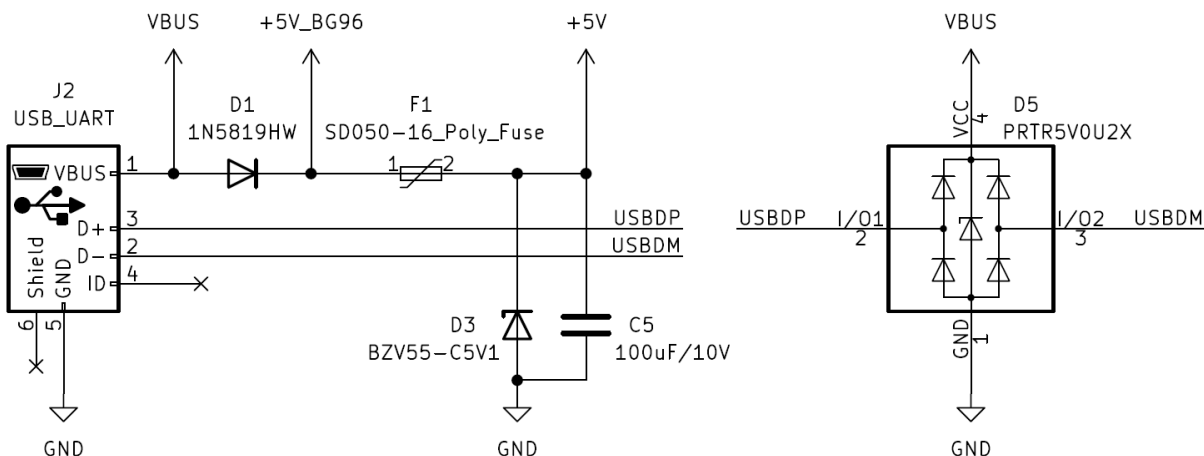
Diódy D1 a D2 chránia koncentrátor v prípade pripojenia opačnej polarität napätia, respektíve bránia nežiadúcemu smeru prúdu naspäť do USB.

Napät'ová vetva +5V_BG96 napája dosku s RF modulom, pričom medzi ňou a +5V vetvou napojenou na LDO, je poistka F1, ktorá chráni obvod pred prípadným skratom.

Zenerova dióda D3, paralelne pripojená ku kondenzátoru C5, funguje ako regulátor, pretože udržiava konštantný napät'ový úbytok, aj keď sa mení veľkosť prechádzajúceho prúdu.

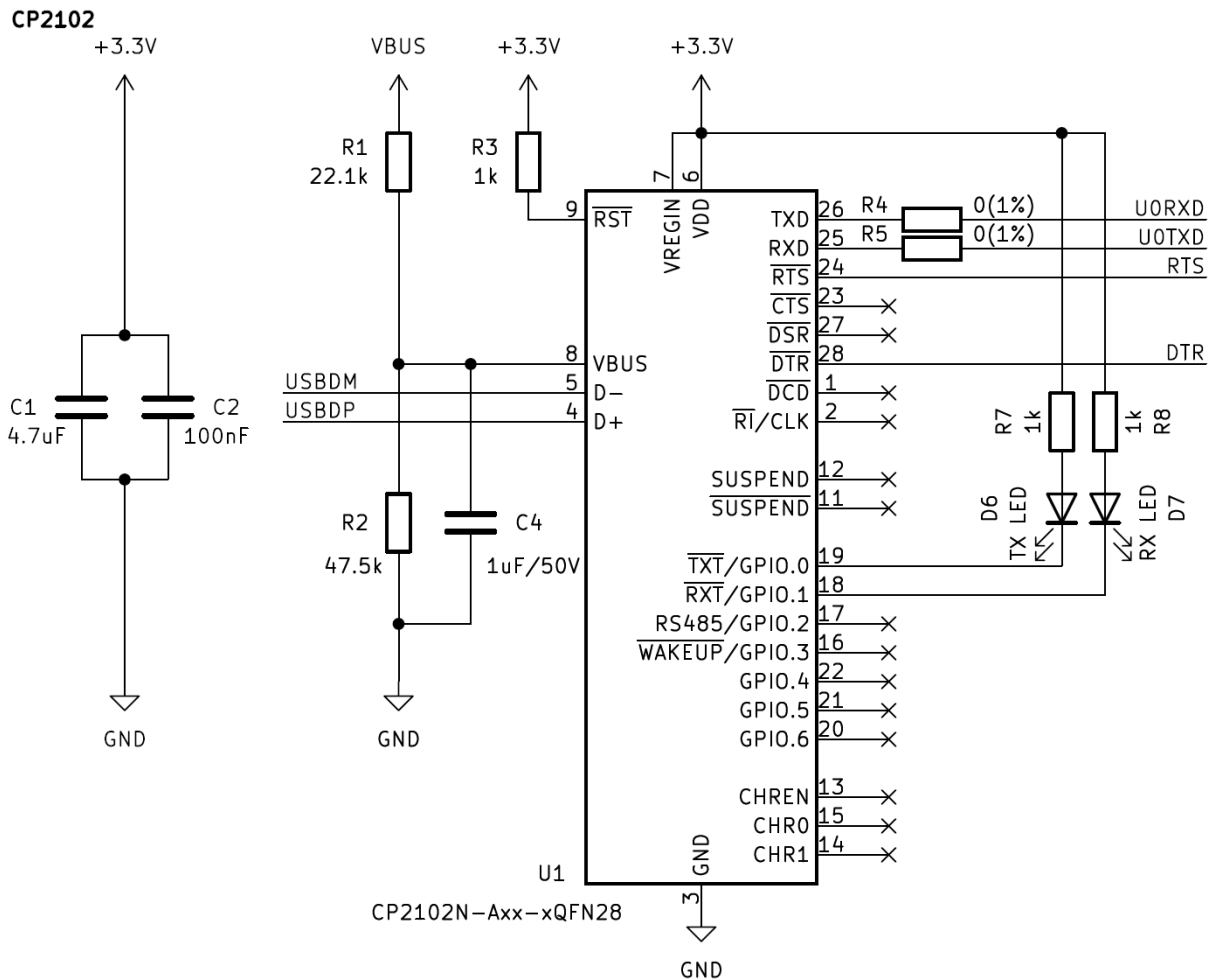
D4 a D5 sú ochranné zariadenia dátových liniek USB rozhrania proti elektrostatickému napät'iu ESD (Electro Static Discharge).

USB to UART (CP2102)



Obr. 5.7) Schéma zapojenia USB konektora na pripojenie k USB/UART prevodníku

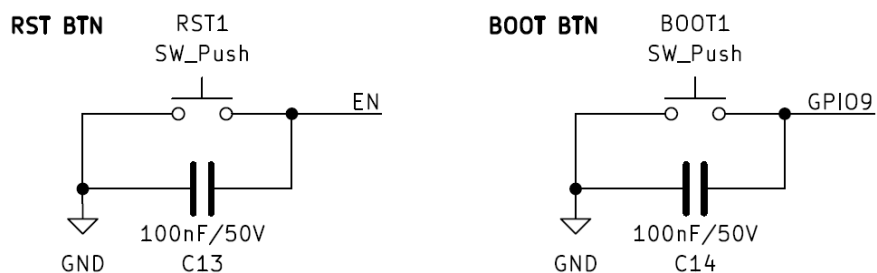
Použitý USB/UART prevodník, ktorý slúži na komunikáciu s nadradeným zariadením je CP2102 od Silicon Labs. Čip U1 je podobne ako ostatné integrované obvody doplnený pasívnymi súčiastkami podľa odporúčaní výrobcu, uvedených v datasheete.



Obr. 5.8) Schéma zapojenia USB/UART prevodníku CP2102

Programovanie mikrokontroléra ESP32-C3 je zaistené cez sériové rozhranie UART. Aby bolo možné nahrat' kód do mikrokontroléra, musí byť počas resetu v „boot“ móde, čoho možno dosiahnuť konkrétnou konfiguráciou „strapping“ pinov, ktorá je špecifikovaná v datasheete. ESP32-C3 má 3 strapping piny: GPIO2, GPIO8 a GPIO9. Piny GPIO2 a GPIO8 sú počas programovania v logickej úrovni 1, k čomu slúžia externé pull-up rezistory R15 a R16 (Obr. 5.10). Enable pin EN má tiež externý pull-up rezistor R9 (Obr. 5.4).

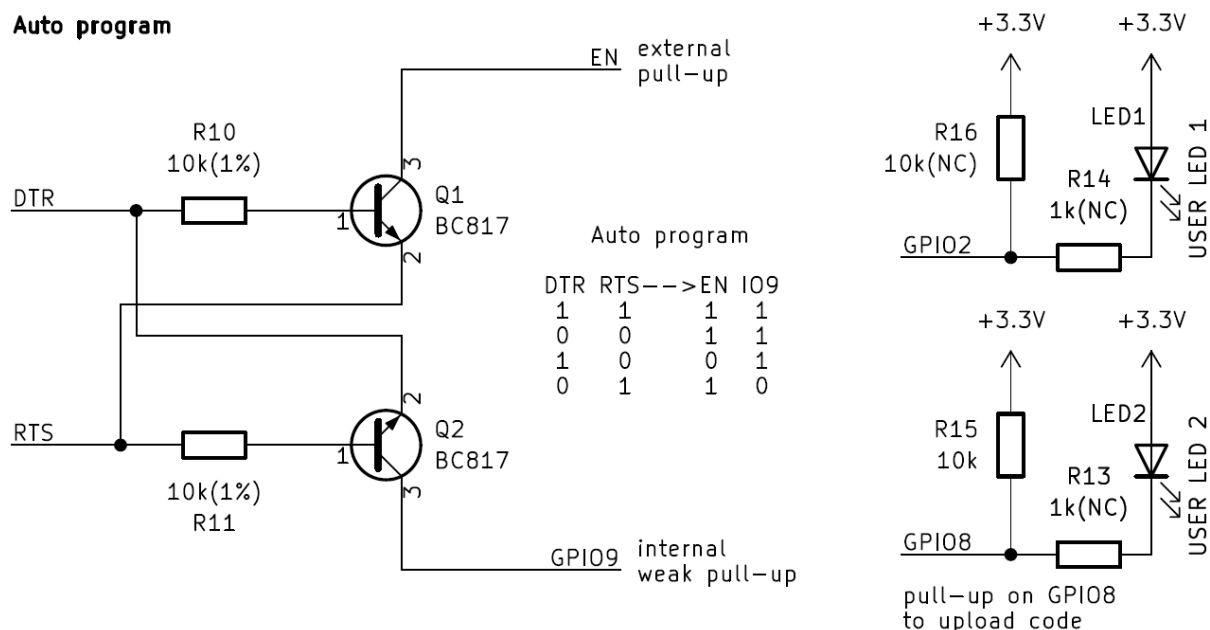
Strapping pin GPIO9 má interný pull-up a na to aby mikrokontrolér spustil bootloader, musí byť tento pin podľa datasheetu stiahnutý do logickej 0 počas resetu. To možno spraviť manuálne tlačidlom, ktoré ho spojí s napätovou úrovňou GND, avšak to nie je úplne praktické.



Obr. 5.9) Schéma zapojenia tlačidiel RESET a BOOT

Spôsob ako docieľiť, že čip prejde automaticky do boot módu, je zapojiť piny USB/UART prevodníka DTR (Data Terminal Ready) a RTS (Ready To Send) cez tranzistory Q1 a Q2 k signálom EN a GPIO9 tak, ako je zobrazené na nasledujúcej schéme.

Auto program

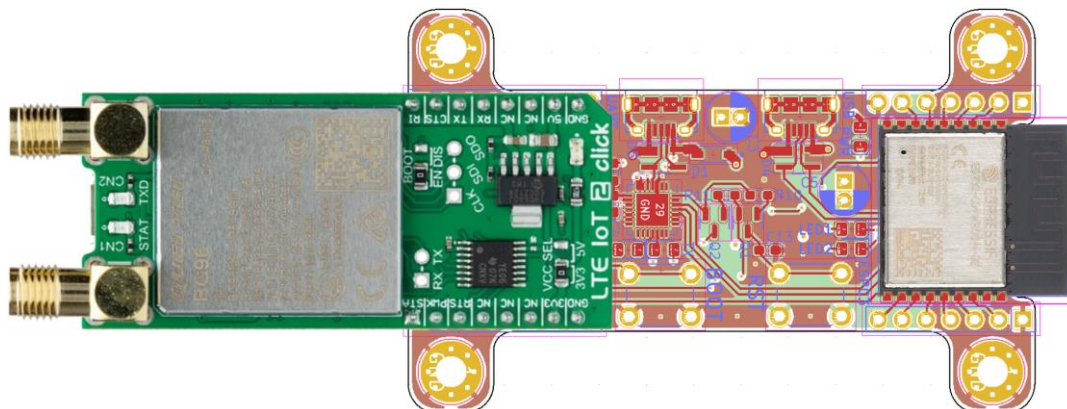


Obr. 5.10) Schéma obvodu na automatický prechod do „boot“ módu pri programovaní

Po nahraní kódu fungujú GPIO2 a GPIO8 rovnako ako ostatné GPIO piny, takže sú na nich pripojené používateľské diódy LED1 a LED2, ktoré sú v „active low“ móde.

Routovanie plošných spojov

DPS koncentrátora je navrhnutá tak, aby antény modulov boli na opačných stranách ako je znázornené na obrázku Obr. 5.11 a eliminovalo sa tak ich prípadné rušenie.

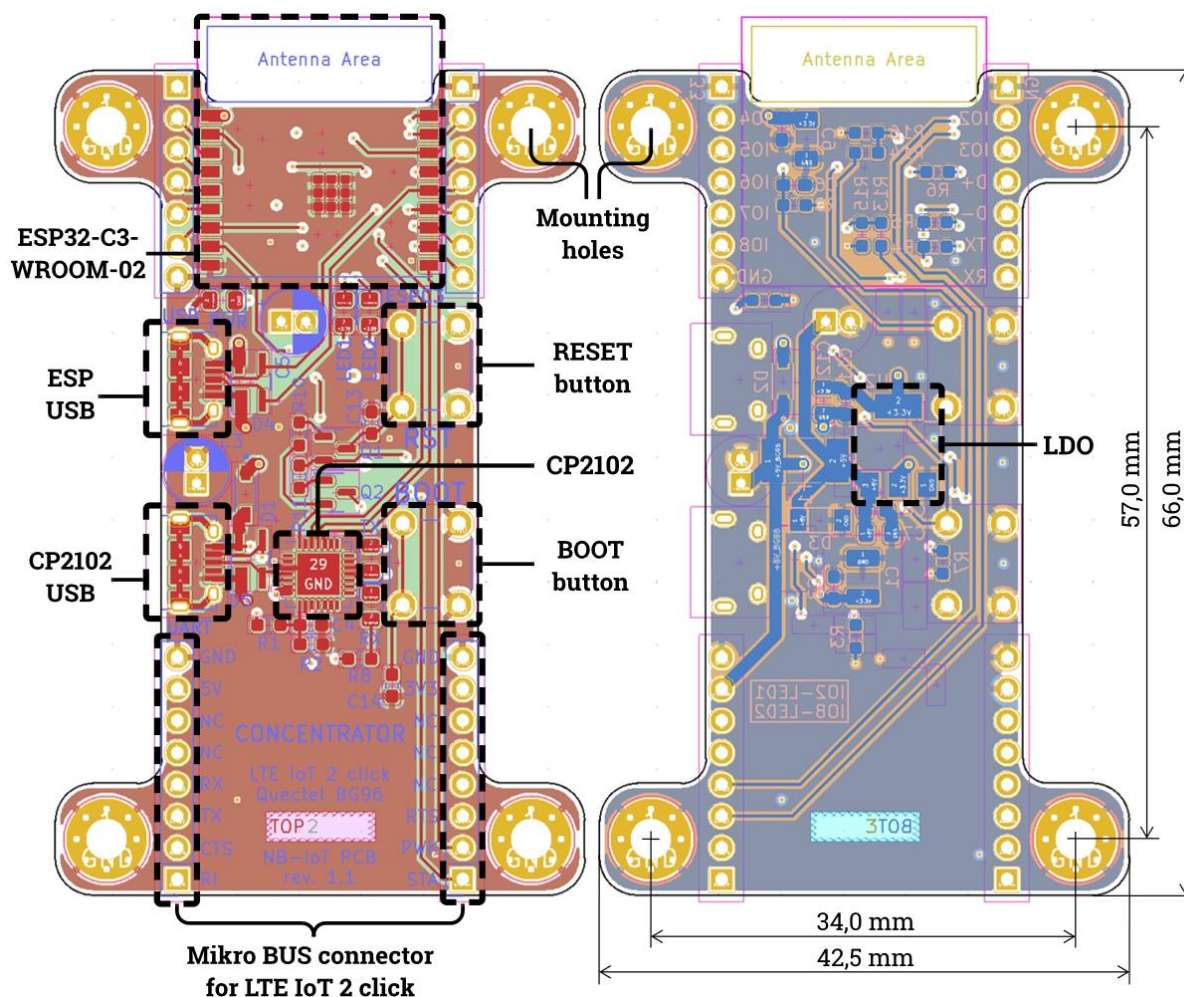


Obr. 5.11) Pripojenie LTE IoT 2 click na DPS NB-IoT koncentrátora

Pri návrhu DPS bola zvolená 4-vrstvá doska. Vonkajšie vrstvy sú signálové, označené TOP a BOT. Celá vnútorná vrstva číslo 2 je na napäťovom potenciáli GND a medená vrstva 3 zas celá +3.3V. Výrazne sa tak uľahčí routovanie spojov a na cenu dosky to nemá takmer žiaden vplyv. DPS doska bola objednaná od výrobcu JLCPCB [73] v minimálnom množstve 5 kusov za 200 Kč (bez ceny dopravy).

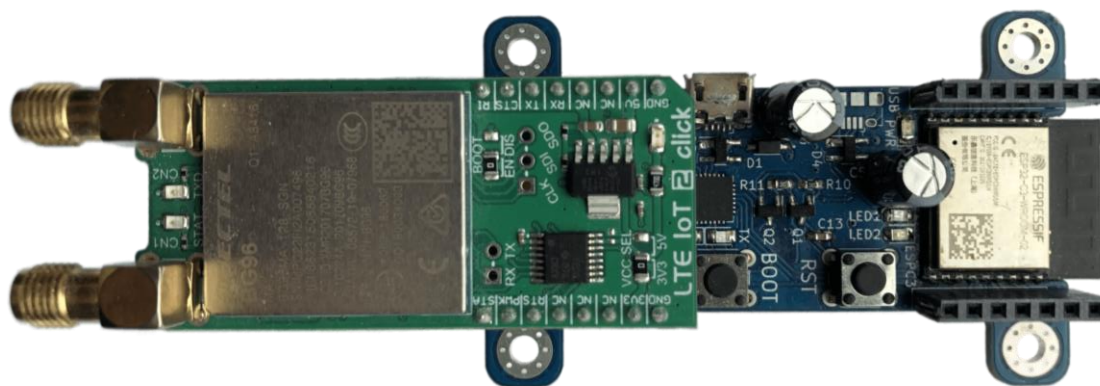
V tejto kapitole je však opísaná už 2. revízia DPS, pretože pri prvej sa ukázalo, že „auto boot“ obvod nebol správne navrhnutý. V tejto verzii (rev. 1.1) boli tiež spravené menšie úpravy ako napríklad pridanie montážnych otvorov, keby bolo potrebné dosku niekde uchytiť.

Na obrázku Obr. 5.12 je layout hornej vrstvy (vľavo) a spodnej vrstvy (vpravo). Vyznačené sú tiež základné rozmery, niektoré súčiastky a ich footprint.



Obr. 5.12) Layout vrchnej (TOP) a spodnej (BOT) vrstvy navrhutej DPS

Súčiastky na DPS boli osadené ručne, pričom na ESP modul bolo potrebné použiť aj elektrickú „hot plate“. Celý projekt vlastnej DPS, vrátane schémy zapojenia, layoutu, gerber súborov a zoznamu súčiastok sa nachádza v externej prílohe diplomovej práce.



Obr. 5.13) Osadená DPS NB-IoT koncentrátora s komunikačným modulom LTE IoT 2 click


5.4 Senzorické uzly

Každý senzorický uzol sa skladá z vývojovej dosky **ESP32-C3-DevKitC-02** a **senzora** na snímanie konkrétnej veličiny. S ohľadom na obmedzený rozpočet, relatívne lacné vývojové dosky (nízka presnosť analógovo/digitálneho prevodníka ESP modulov) a iba demonštratívny charakter aplikácie sa bude aj pri výbere senzorov brať do úvahy „tradeoff“ medzi presnosťou a cenou.

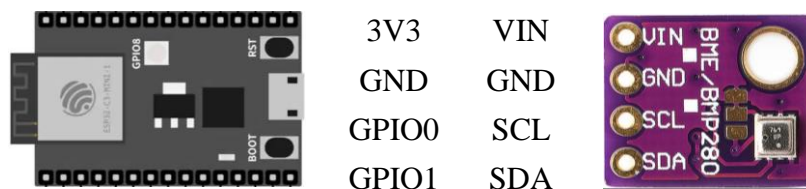
5.4.1 Senzor teploty, tlaku a vlhkosti

Digitálny senzor BME280 od spoločnosti Bosch Sensortec umožňuje merať teplotu, tlak a navyše aj vlhkosť, hoci to nie je priamo požadovaná veličina systému. Na PBR bude merať podmienky v okolí pestovaného média. Senzor sa vyznačuje veľmi malými rozmermi, dobrým rozlíšením aj relatívne vysokou presnosťou.

Tab. 5.3) Parametre senzora BME280 [74]

| | | | | |
|---|--------------|-----------------|---------------------------|------------|
|  | Interface: | I2C | Resolution – temperature: | 0,01 °C |
| | Supply: | 1,8 ÷ 5 V | Resolution – pressure: | 0,008 % RH |
| | Temperature: | -40 ÷ 85 °C | Resolution – humidity: | 0,18 Pa |
| | Pressure: | 300 ÷ 1100 hPa | Accuracy – temperature: | ± 1 °C |
| | Humidity: | 0 ÷ 100 % RH | Accuracy – pressure: | ± 3 % |
| | Dimensions: | 2,5×2,5×0,93 mm | Accuracy – humidity: | ± 1 Pa |
| | | | | |

Použitý senzor je súčasťou DPS (dosky plošných spojov), ktorá má vyvedené piny. Cena modulu je 290 Kč. Vývojová doska s ním bude komunikovať cez protokol I2C (Integrated Circuit). Zapojenie dosky a senzora je nasledujúce:




Obr. 5.14) Zapojenie riadiacej dosky a senzora BME280

5.4.2 Senzor intenzity osvetlenia

Meranie intenzity svetla je realizované pomocou jednoduchého fotorezistora. Fotorezistor je pasívny prvok, ktorý mení veľkosť svojho elektrického odporu v závislosti od intenzity dopadajúceho svetla. Fotorezistor je určený na meranie intenzity osvetlenia systému trubiek PBR, keďže ide o dôležitý faktor pri fotosyntéze.

Tab. 5.4) Parametre fotorezistora GL5528 [75]

| | | |
|---|----------------------------|-------------|
|  | Max voltage: | 150 V |
| | Max power dissipation: | 100 mW |
| | Environmental temperature: | -30 ÷ 70 °C |
| | Light resistance (10 lx): | 10 ÷ 20 kΩ |
| | Dark resistance: | 1 MΩ |
| | γ_{10}^{100} : | 0,6 |

Intenzita osvetlenia sa meria v jednotkách lux. Parameter gama (γ_{10}^{100}) uvedený v tabuľke je potrebný na prepočet odporu fotorezistora na intenzitu osvetlenia. Cena fotorezistora GL5528 je menej ako 10 Kč.

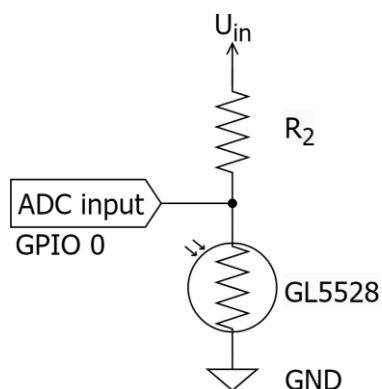
Keďže ide o analógový senzor, bude potrebné použiť perifériu analógovo/digitálny prevodník (ADC). Senzor bude napájaný z dosky, do série zapojený s ďalším rezistorom, čím sa zabezpečí, že merané napätie nepresiahne horný limit A/D prevodníku. Veľkosť napätia na vstupe analógového pinu potom určuje rovnica napäťového deliča:

$$U_{ADC} = U_{in} \cdot \frac{R_{GL5528}}{R_{GL5528} + R_2} [V] \quad (1)$$

kde:

U_{in} [V] napájacie napätie (3,3 V)
 R_2 [Ω] odpor rezistora (10 k Ω)
 R_{GL5528} [Ω] odpor fotorezistora

Zapojenie senzora a vývojovej dosky je zobrazené na schéme Obr. 5.15:




Obr. 5.15) Schéma zapojenia fotorezistora GL5528

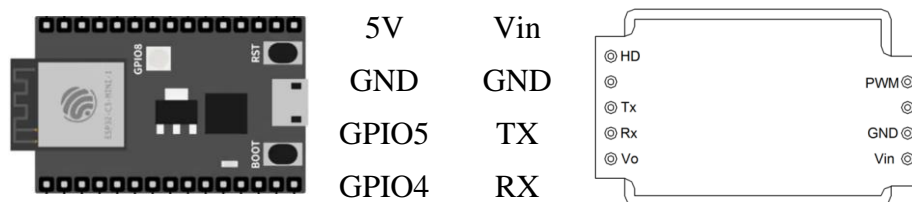
5.4.3 Senzor koncentrácie CO₂

Na meranie koncentrácie CO₂ je použitý digitálny senzor MH-Z19B. Ide o relatívne malý senzor využívajúci princíp NDIR (Non-Dispersive Infrared) spektroskopie na analýzu koncentrácie daného plynu, v tomto prípade CO₂, na základe jeho charakteristickej absorpcie infračerveného žiarenia.

Tab. 5.5) Parametre modulu MH-Z19B [76]

| | | | | |
|---|--------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|
|  | Gas detected: | CO ₂ | Output signals: | UART (TTL 3,3 V) |
| | Operating voltage: | 4,5 ÷ 5,5 V | | PWM |
| | Measuring range: | 0 ÷ 5000 ppm | | Analog (0,4 ÷ 2 V) |
| | Preheating time: | 180 s | Working temp.: | 0 ÷ 90 % RH |
| | Response time: | T ⁹⁰ < 120 s | Dimensions: | 33×20×9 mm |
| | Accuracy: | ± (50 ppm + 3 % reading value) | | |

Cena modulu MH-Z19B je okolo 1000 Kč. Pre vyčítanie meraných dát bude z trojice dostupných možností použité rozhranie UART, ktorého zapojenie s vývojovou doskou je nasledovné:



Obr. 5.16) Zapojenie riadiacej dosky a senzora MH-Z19B

5.4.4 Senzor pH kvapaliny

Na meranie pH pestovaného média pre PBR je použitý analógový modul PH-4502C od DIY More, na ktorý sa pripája meracia sonda. Princíp merania pH je založený na rozdieloch potenciálov 2 elektród (senzorovej a referenčnej). Výmena iónov medzi roztokom vzorky a referenčným roztokom (pH 7) generuje napätie, ktoré modul zosilňuje.

Tab. 5.6) Parametre modulu PH-4502C [77]

| | | |
|--|--------------------------|---------------------|
| | V _{CC} voltage: | 5 ± 0,2 V |
| | Current: | 5 ÷ 10 mA |
| | Output voltage: | 0 ÷ V _{CC} |
| | Operating temp.: | -10 ÷ 50 °C |
| | Detected temp.: | 0 ÷ 60 °C |
| | Connector: | BNC |
| | Weight: | 25 g |
| | Dimensions: | 42×32×20 mm |

Modul má 2 potenciometre. Jeden pre nastavenie thresholdu digitálneho výstupu, ktorý sa v tomto prípade nepoužíva a druhý, ktorý nastavuje offset výstupného napätia. Parametre sondy sú nasledujúce:

Tab. 5.7) Parametre sondy DIY MORE E201 [78]

| | | |
|--|----------------|----------------|
| | Range: | 0 ÷ 14 pH |
| | Accuracy: | ± 0,5 |
| | Response time: | < 5 s |
| | Settling time: | 60 s |
| | Dimensions: | ø12,5 × 160 mm |

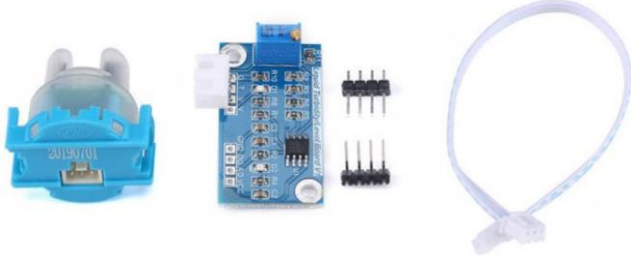
Cena modulu je približne 380 Kč a sondy 330 Kč, pričom ako ukazuje parameter accuracy, nejde o veľmi presnú sondu, avšak napriek tomu poslúži na potreby tejto aplikácie. Modul je napájaný jednosmerným napätím 5 V z vývojovej dosky, ale keďže horný limit ADC na ESP32-C3 je len 2500 mV, bude potrebné pridať napäťový delič s deliacim pomerom 1:2, teda odpory oboch rezistorov budú rovnaké.

5.4.5 Senzor zákalu

Senzor TS-300B využíva optický princíp na stanovenie zákalu snímaného roztoku pomocou infračervenej svetelnej závoery. Množstvo prepusteného svetla prechádzajúceho kontrolovanou

kvapalinou závisí na stupni kontaminácie. Väčšie množstvo častíc a nečistôt v kvapaline prepustí menej svetla. Snímač detekuje svetlo z vysielča a prevádza jeho intenzitu na výstupný napät'ový signál, ktorý spracováva mikrokontrolér pomocou ADC. Modul má aj digitálny výstup, ktorý reaguje na threshold nastaviteľný pomocou potenciometra.

Tab. 5.8) Parametre modulu TS-300B [79]


| | | |
|---|--------------------------|------------|
|  | V _{CC} voltage: | 5 V |
| | Current: | 40 mA |
| | Analog output: | 0 ÷ 4,5 V |
| | Response time: | < 500 ms |
| | Operating temperature: | 5 ÷ 90 °C |
| | Dimensions: | 39 × 22 mm |

Čidlo TS-300B stojí 560 Kč. Kvôli veľkosti výstupného napätia, ktoré presahuje možnosti ADC, musí byť opäť použitý napät'ový delič 1:2.

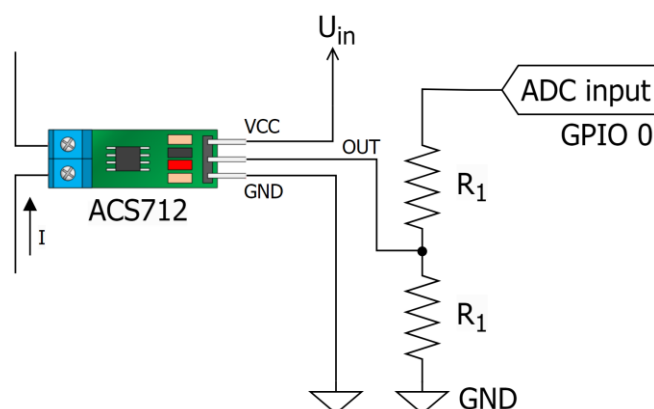
5.4.6 Senzor elektrického prúdu

Senzor elektrického prúdu ACS712 funguje na princípe Hallovho javu. Elektrický prúd prechádzajúci svorkami generuje magnetické pole. V jeho blízkosti sa na module nachádza integrovaný obvod, ktorý následne generuje elektrické napätie, ktorého veľkosť je lineárne závislá na veľkosti elektrického prúdu. Prúd je možné merať v oboch smeroch, pričom výstupná hodnota napätia zo senzora pri prúde 0 A je polovica napájacieho napätia.

Tab. 5.9) Parametre modulu ACS712 [80]

| | | | | |
|---|--------------------------|---------------------|--------------|---------------|
|  | V _{CC} voltage: | 5 V | Sensitivity: | 66 ÷ 185 mV/A |
| | Current range: | ± 20 A | Accuracy: | 1,5 % |
| | Output voltage range: | 0 ÷ V _{CC} | Rise time: | 5 μs |
| | Output voltage (I = 0A): | V _{CC} /2 | Dimensions: | 31 × 13 mm |

Cena modulu je 60 Kč. Napätie na vstupe ADC pinu bude opäť znížené napät'ovým deličom $R_1 = 100\text{ k}\Omega$, pretože senzor je napájaný z 5 V pinu.



Obr. 5.17) Schéma zapojenia modulu ACS712

Na PBR meria senzor elektrický prúd, ktorý prechádza vzduchovým čerpadlom, pretože pri hodnotení efektívnosti PBR je jedným zo zaujímavých ukazovateľov pomer medzi spotrebovanou elektrickou energiou a množstvom premeneného CO₂.

6 Firmware

Najväčšia časť práce spočíva vo vývoji firmwaru (FW) a návrhu uceleného riadiaceho algoritmu, ktorý by mal byť v rámci možností ľahko škálovateľný a dostatočne prehľadný. Súčasťou demonštrácie NB-IoT technológie a funkčnosti celej aplikácie je vývoj aspoň minimálnej podoby FW pre koncentrátor a 6 senzorických uzlov.

V rámci aplikácie je použitých aj mnoho vlastných knižníc. Táto kapitola sa nesnaží vysvetliť detaily ako fungujú, ale opísať štruktúru zdrojového kódu na vyššej úrovni abstrakcie.

6.1 Vývojové prostredie

Pri výbere embedded platformy hrajú dostupné, či už SW alebo HW, vývojové nástroje veľmi dôležitú rolu. Nastavenie a konfigurácia vývojového prostredia na programovanie embedded systémov je spravidla časovo náročný a vyčerpávajúci proces. Dôvodom sú časté problémy spojené s kompatibilitou. Navyše debugovanie, testovanie a hlavne oživovanie dosiek je tiež komplikované, keďže sa nezaobíde bez špecializovaného HW vybavenia ako osciloskop, laboratórny zdroj, multimeter a podobne.

Zdrojový kód firmwaru pre túto aplikáciu je písaný v jazyku C. Na vývoj bol nakoniec uprednostnený nástroj **Visual Studio Code** pred inými alternatívami, ako napríklad prostredím Espressif-IDE, ktoré síce priamo podporuje dosky rady ESP32, avšak je pomalšie a zo subjektívneho hľadiska menej prehľadné.

6.1.1 PlatformIO

Samotný Visual Studio Code je len editor zdrojového kódu, ktorý je užitočný až po nainštalovaní potrebných „plug-in“ rozšírení. Na programovanie mikrokontrolérov je použité rozšírenie PlatformIO IDE, ktoré podporuje mnoho vývojových platforiem a frameworkov vrátane tých, ktoré umožňujú programovať ESP32-C3, ako Arduino alebo ESP-IDF.

Každý projekt vytvorený cez PlatformIO obsahuje súbor "**platformio.ini**", ktorý slúži na konfiguráciu daného projektu. Možno si v ňom definovať odlišné prostredia s rôznymi nastaveniami ako napríklad typ platformy, použitú dosku, framework, číslo COM portu pri nahrávaní kódu a ďalšie.

6.1.2 ESP-IDF

ESP-IDF je oficiálny IoT vývojový framework od Espressif. ESP-IDF poskytuje rôzne funkcie, komponenty aj základné drivery periférií potrebné v tejto aplikácii ako napríklad Bluetooth, UART, ADC, GPIO, NVS (Non-Volatile Storage) a ďalšie.

Medzi komponentami ESP-IDF je tiež real-time operačný systém **FreeRTOS**, čo výrazne uľahčuje programovanie embedded aplikácii, pretože poskytuje pohodlný spôsob pravidelného vykonávania definovaných vlákien, tzv. taskov. FreeRTOS task je nezávislý kód v rámci programu, ktorý má priradenú prioritu s akou sa vykonáva, kontext a vlastný stack v pamäti. Pri časovaní taskov sa FreeRTOS spolieha na perifériu systémový časovač, timer, ktorý generuje pravidelné prerušenia. Keď sa objaví prerušenie, FreeRTOS spustí scheduler, ktorý na základe priority vlákien rozhodne, aké vlákno sa bude vykonávať ďalej. Scheduler tak prepne kontext mikrokontroléra, čím mu umožní pokračovať v danom tasku tam, kde predtým skončil. Tento proces sa opakuje pri každom prerušení systémového časovača, vďaka čomu je FreeRTOS schopný poskytnúť „multi-tasking“ možnosti, bez potreby vlastného schedulera.

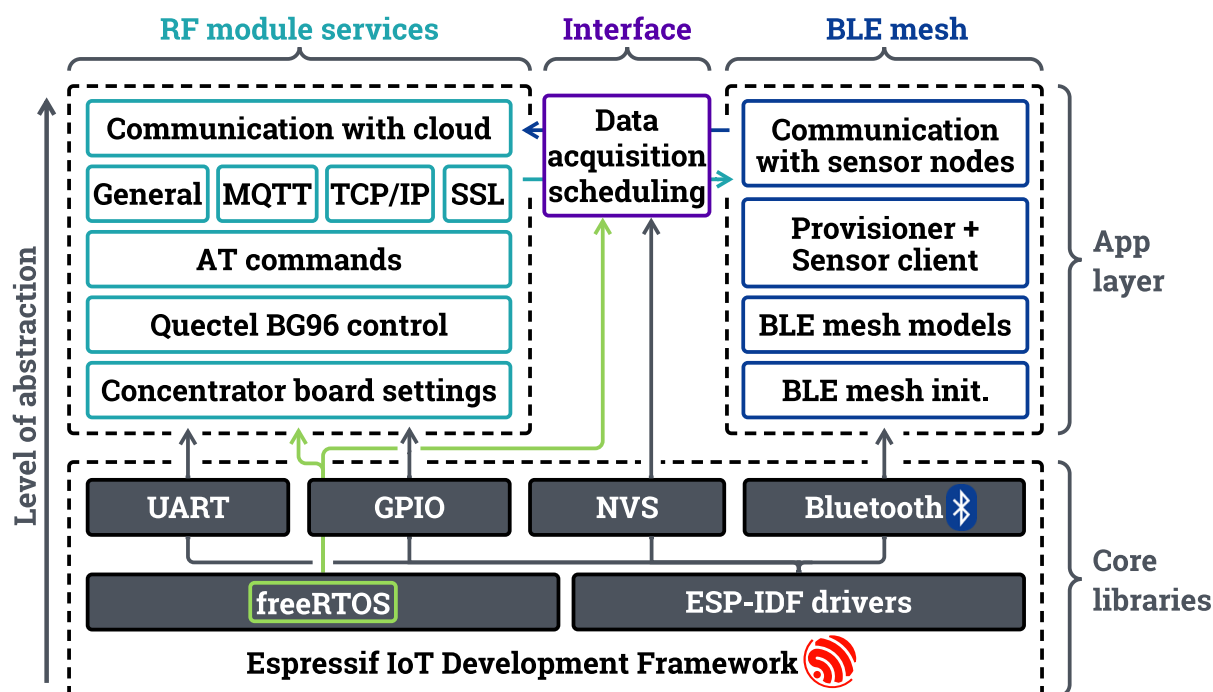
Nastavenia ESP-IDF projektu, vrátane frekvencie systémového časovača, potrebných driverov a knižníc sa konfigurujú cez tzv. „Project Configuration Menu“, ktoré generuje hlavičkový súbor "sdkconfig.h". Spustenie rozhrania pre editáciu konfiguračného menu v príkazovom riadku PlatformIO sa zavolá príkazom "platformio run -t menuconfig".

Na programovanie mikrokontroléra, v zmysle nahrania FW, nie je potrebný externý programátor ani JTAG debugger. ESP32 využíva vstavaný bootloader, čo je malá časť kódu zodpovedajúceho za vyčítanie dát zo sériového portu a nahratie kódu do flash pamäte.

6.2 NB-IoT koncentrátor

Firmware NB-IoT koncentrátora sa skladá z 3 hlavných častí na aplikačnej vrstve:

- Obsluha RF modulu Quectel BG96 na obojsmernú komunikáciu s cloudom cez NB-IoT.
- Inicializácia BLE mesh siete a zber dát zo senzoričkových uzlov.
- Rozhranie medzi zberom senzoričkových dát a ich pravidelným odosielaním na cloud.



Obr. 6.1) Architektúra navrhnutého FW NB-IoT koncentrátora

Obrázok Obr. 6.1 sa snaží vizualizovať štruktúru architektúry FW, pričom vyššie časti reprezentujú funkcie a koncepty s vyššou úrovňou abstrakcie a naopak. Zdrojový kód zobrazený v aplikačnej vrstve predstavujú vlastné knižnice napísané pre potreby tejto aplikácie. Postavené sú na frameworku ESP-IDF, ktorý ako už bolo povedané poskytuje drivery periférií mikrokontroléra a zároveň prístup ku komponentom systému FreeRTOS.

6.2.1 Obsluha RF modulu

Riadiaci mikrokontrolér ESP komunikuje s RF modulom Quectel BG96 cez zbernicu UART s rýchlosťou 115 200 kb/s. RF modul je potrebné spustiť, a to stiahnutím pinu PWK (Power Key) do úrovne GND po dobu aspoň 500 ms. Číslo používaných pinov sú definované cez makrá, aby ich bolo možné jednoducho zmeniť v prípade zmeny layoutu dosky. Je teda zrejmé,

že pri obsluhu modulu sú potrebné ESP-IDF drivery aspoň pre GPIO piny a tiež zbernicu UART ako vidno na obrázku Obr. 6.1.

Protokol na ovládanie RF modulu využíva tzv. AT (Attention) príkazy, definované jeho výrobcom. Jeden príkaz môže mať všeobecne 4 rôzne formy, typy. Uvedené sú v Tab. 6.1, kde symbol "<x>" označuje názov daného príkazu a "<...>" sú jeho parametre a hodnoty.

Tab. 6.1) Typy AT príkazu

| Typ príkazu | Syntax | Popis |
|-------------|--------------|--|
| TEST | AT+<x>=? | Vráti zoznam parametrov a hodnôt, ktoré možno nastaviť daným WRITE príkazom alebo vnútorným procesom modulu. |
| READ | AT+<x>? | Vráti aktuálne nastavenú hodnotu daného parametra alebo niekoľkých parametrov. |
| WRITE | AT+<x>=<...> | Nastaví požadovanú hodnotu danému parametru. |
| EXECUTION | AT+<x> | Prečíta a vráti hodnotu nemeniteľného parametra, ktorý je ovplyvnený len vnútornými procesmi modulu. |

Zoznam všetkých, vyše 200 AT príkazov modulu BG96, vrátane ich bližšieho popisu, parametrov a hodnôt je v manuáli [71]. Na ovládanie Quectel modulov samozrejme existujú knižnice tretích strán, avšak pri spracovávaní tejto práce sa nepodarilo nájsť takú, ktorá by spĺňala požiadavky na zabezpečenie MQTT komunikáciu cez protokol SSL, a preto už na spodnej úrovni aplikačnej vrstvy bolo potrebné navrhnuť vlastné knižnice. Tie samozrejme využívajú len zlomok dostupných príkazov.

So zreteľom na modularitu kódu boli pri vývoji FW zohľadnené jednotlivé typy AT príkazov a to tak, aby boli jednoducho definované a až vyššie úrovne programu rozhodovali o tom, aký typ daného príkazu a s akými parametrami sa pošle RF modulu. Na základe toho do akej rodiny AT príkazy patria sú rozdelené na General, MQTT, TCP/IP a SSL.

Komponenty real-time operačného systému FreeRTOS sú použité pri komunikácii medzi modulmi. Okrem taskov ide hlavne o primitíva ako „queue“ (fronta), „timer“ (časovač) a „inter-task notifications“ (vzájomné upozornenia medzi vláknami). Jadro komunikačnej logiky tvorí vlastný „scheduler“ (plánovač), ktorý asynchrónne vyčítava AT príkazy z fronty a odosiela ich RF modulu tak rýchlo ako je to možné. Každý komunikačný cyklus zahŕňa odoslanie AT príkazu, potvrdenie jeho príjmu a spracovanie odpovede.

Celý mechanizmus riadenia RF modulu a MQTT komunikácie s AWS je zaobalený do funkcií s vyššou úrovňou abstrakcie, ktoré na pozadí spúšťajú potrebné procesy a navonok umožňujú pohodlnú inicializáciu a ovládanie modulu BG96 z iných častí zdrojového kódu.

Aby sa RF modul mohol verifikovať voči AWS serveru a následne s ním komunikovať je potrebné jednorazovo nahráť potrebné certifikáty do file systému modulu. Postup je popísaný na strane 29 v dokumente Quectel_BG96_MQTT_Application_Note_V1.2 [71].

6.2.2 BLE mesh

Okrem komunikácie s cloudom musí koncentrátor zabezpečiť aj vytvorenie lokálnej BLE mesh siete a nadviazať spojenie so senzorickými uzlami. K tomu je nevyhnutne potrebný Bluetooth driver ako znázorňuje pravá strana obrázka Obr. 6.1. Ten ovláda potrebné periférie a vysiela signál pomocou PCB antény integrovanej na doske modulu ESP32-C3.

Špecifikácia a vlastnosti protokolu BLE mesh sú veľmi obsiahla téma. Z vývojárskeho hľadiska je tu niekoľko základných konceptov, ktoré je dôležité poznať, a ktoré sú prehľadne zhrnuté v [81]. Pri zjednodušenom pohľade je však správanie aj rola jedného elementu v rámci siete ovplyvnená tzv. modelmi, ktoré sú vo FW daného zariadenia implementované. Dôležité je, že tieto modely sú definované na úrovni ESP-IDF a je na vývojároch, aby ich vhodným spôsobom poskladali alebo upravili na dosiahnutie požadovaného správania elementu BLE mesh siete.

FW NB-IoT koncentrátora implementuje tieto 3 modely:

- **Configuration Server Model** – jeho implementácia je povinná pre všetky zariadenia, pretože umožňuje ich konfiguráciu pred tým, než sa stanú súčasťou BLE mesh siete.
- **Configuration Client Model** – poskytuje uzlu schopnosť konfigurovať zariadenia, ktoré implementujú Configuration Server model.
- **Sensor Client Model** – číta dáta a konfiguruje elementy siete, ktoré implementujú Sensor Server model.

Uzol, ktorý je schopný inicializovať BLE mesh sieť a pridávať do nej ďalšie zariadenia sa nazýva „**provisioner**“. Kým pri spotrebiteľských aplikáciách je ním zvyčajne smartphone alebo tablet, v tomto prípade hrá jeho rolu NB-IoT koncentrátor, a preto musí jeho FW implementovať Configuration Client model. Sensor Client model je zas nevyhnutný pri konfigurácii Sensor Server modelov, ktoré sú implementované vo FW senzorických uzlov.

Pri návrhu BLE mesh knižníc bol kladený veľký dôraz na to, aby neboli závislé na počte veličín, ktoré Sensor Server meria ani na konkrétnych senzoroch, ktoré používa. BLE mesh „descriptor“ bol upravený tak, že každé zariadenie pri vstupe do siete sa jednorazovo predstaví počtom meraných fyzikálnych veličín a pre každú z nich uvedie názov veličiny, ďalej názov senzora, ktorý ju meria, fyzikálnu jednotku a dátový typ.

Z praktického hľadiska to pri vývoji znamená, že koncentrátor je plne nezávislý na senzorických uzloch, ktoré môžu byť ľubovoľne pridávané do systému ak dodržia rovnakú formu descriptora.

6.2.3 Zber senzorických dát a komunikácia s cloudom

Pomyselný most medzi obsluhou RF modulu a komunikáciou so senzorickými uzlami tvorí rozhranie, ktoré má 2 úlohy. V prvom rade je zodpovedné za pravidelný zber, formátovanie a odosielanie senzorických dát na cloudovú platformu AWS. A na druhej strane informácie z cloudu aj prijíma, pretože aplikácia je navrhnutá tak, aby používateľ mohol nastaviť periódu zberu dát pre jednotlivé senzory. Túto informáciu mikrokontrolér ukladá do „non-volatile“ pamäte, vďaka čomu zostanú nastavenia uložené aj po vypnutí zariadenia.

Koncentrátor odoberá správy z topicu "**BG96_demoThing/mmtPeriods/command**", ktoré majú formu JSON objektu. Správa obsahuje 2 polia, názov daného uzla "**nodeName**" a hodnotu periódy "**period**" v sekundách. Po aktualizovaní periódy sa odpoveď s novou hodnotou odosiela na topic "**BG96_demoThing/mmtPeriods/response**" v rovnakom tvare, pričom v prípade, že daný senzor nie je v sieti registrovaný, je hodnota periódy v odpovedi záporná. Komunikácia s cloudom je súčasťou aj schémy na Obr. 6.3.

Pri BLE mesh komunikácii odosielajú senzory merané veličiny v binárnej forme a až koncentrátor rekonštruje ich hodnoty na základe dátového typu, ktorý poskytol ich descriptor. Správy odosielené na cloud sa posielajú na topic "**BG96_demoThing/sensors/<nodeName>**",

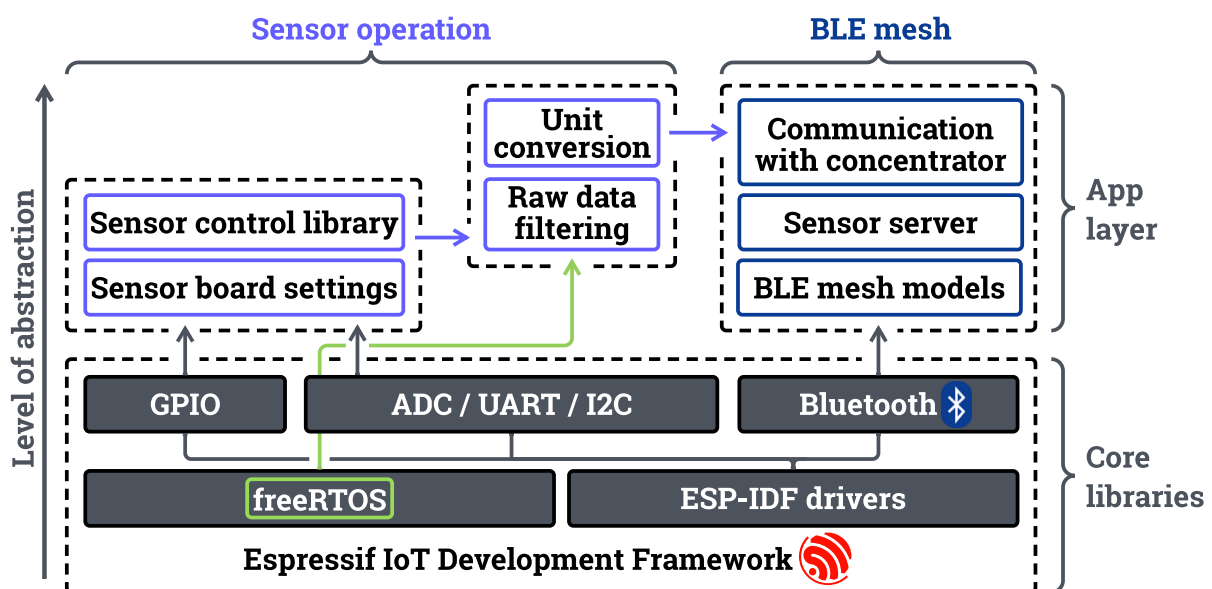
kde "`<nodeName>`" je názov senzorickeho uzla, ktorého dáta sa práve odosielajú. Správy sú opäť v tvare JSON. Príklad MQTT payloadu odosielanej správy na AWS po prijíma dát zo senzora BME280, ktorý sníma teplotu a tlak, by bol nasledujúci:

```
{
  "nodeName": "NODE-BME280",
  "measurements": [
    {
      "sensorName": "BME280",
      "physicalQuantity": "temperature",
      "unit": "°C",
      "value": 24.10
    },
    {
      "sensorName": "BME280",
      "physicalQuantity": " pressure",
      "unit": "kPa",
      "value": 99.08
    }
  ]
}
```

Na uvedenom príklade sa môže informácia o názve senzora "`sensorName`" javiť ako redundantná, pretože sa nachádza aj v samotnom názve uzla "`nodeName`". Dôvodom však je, že riešenie je univerzálne a počíta s možnosťou, že uzol bude obsahovať aj viacero senzorov.

6.3 Senzorické uzly

FW každého senzorickeho uzla má v rovnaký základ. Štruktúra sa skladá opäť z BLE mesh časti a potom obsluhy samotného senzora.



Obr. 6.2) Architektúra navrhnutého FW senzorickeho uzla

Pri senzorickeho uzloch je navyše zrejmé, že BLE mesh časť bude pri všetkých z nich implementovať rovnakú funkcionálnu. Preto pri dômyselnom návrhu FW s dodržaním základných konceptov modularity kódu bude jednoduché využiť rovnaké knižnice naprieč projektami, a to len s minimálnymi úpravami.

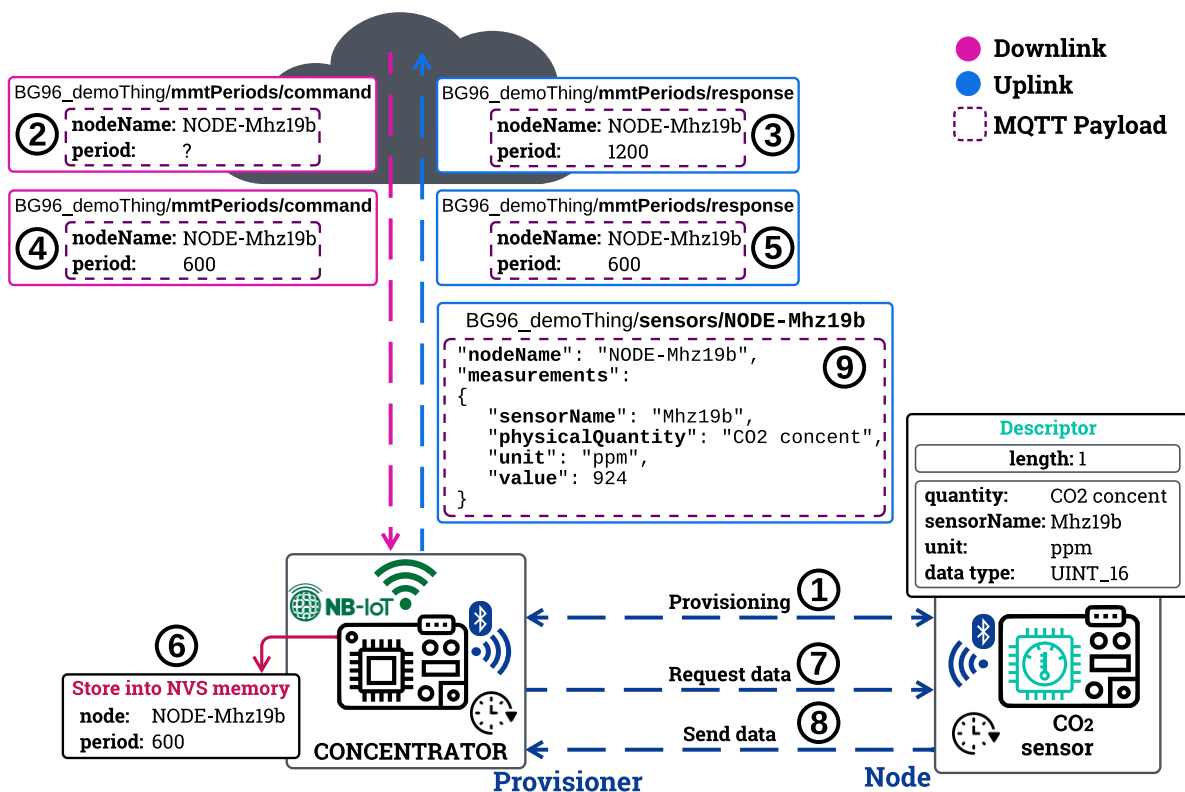
6.3.1 BLE mesh

Na rozdiel od koncentrátora, senzorické uzly nie sú schopné inicializovať vlastnú BLE mesh sieť. Modely, ktoré elementy implementujú sú nasledovné:

- **Configuration Server Model** – je povinný.
- **Sensor Server Model** – obsahuje zoznam senzorov, hodnoty meraných veličín a poskytuje ich „read-only“ spôsobom iným uzlom siete.
- **Sensor Setup Server Model** – umožňuje Sensor Client modelu (v koncentrátore) meniť nastavenia senzorov.

Čo sa týka samotného princípu komunikácie, aplikácia je navrhnutá tak, že senzorické servery neodosielajú dáta samé od seba, ale čakajú na požiadavku zo strany klienta, ktorým je koncentrátor.

Príklad komunikácie medzi koncentrátorom, senzorom a brokerom, vrátane obsahu správ a chronologicky očíslovanými krokmi je znázornený na Obr. 6.3. Ako prvé sa odosiela descriptor a prebieha „provisioning“ zariadenia do BLE mesh siete. Nasleduje dotaz a úprava periódy zberu dát. Nastavenia sa uložia do non-volatile pamäte a odošle sa dotaz na senzorické dáta. Po ich prijatí sa prevedú z binárneho tvaru na dátový typ uvedený v descriptore a odošlú sa na cloud. Kroky 7, 8 a 9 sa opakujú po každom uplynutí periódy pre daný senzor. Kroky 2 až 6 nie sú povinné, koncentrátor použije predvolenú alebo poslednú známu hodnotu periódy.



Obr. 6.3) Príklad komunikačného cyklu

6.3.2 Meranie teploty, tlaku a vlhkosti

Keďže senzor BME280 je populárny aj na účely menších projektov, na jeho obsluhu sú dostupné knižnice, ktoré boli použité aj v tomto prípade. Z ESP-IDF sa využíva driver I2C. Lokálne na senzorickom uzle sa dáta vyčítavajú s periódou 500 ms, čo zabezpečuje FreeRTOS task a koncentrátoru sa posiela posledná nameraná hodnota. Teplota sa prepočítava na jednotky °C, tlak je v kPa a relatívna vlhkosť v percentách. Všetky veličiny používajú dátový typ float.

6.3.3 Meranie intenzity svetla

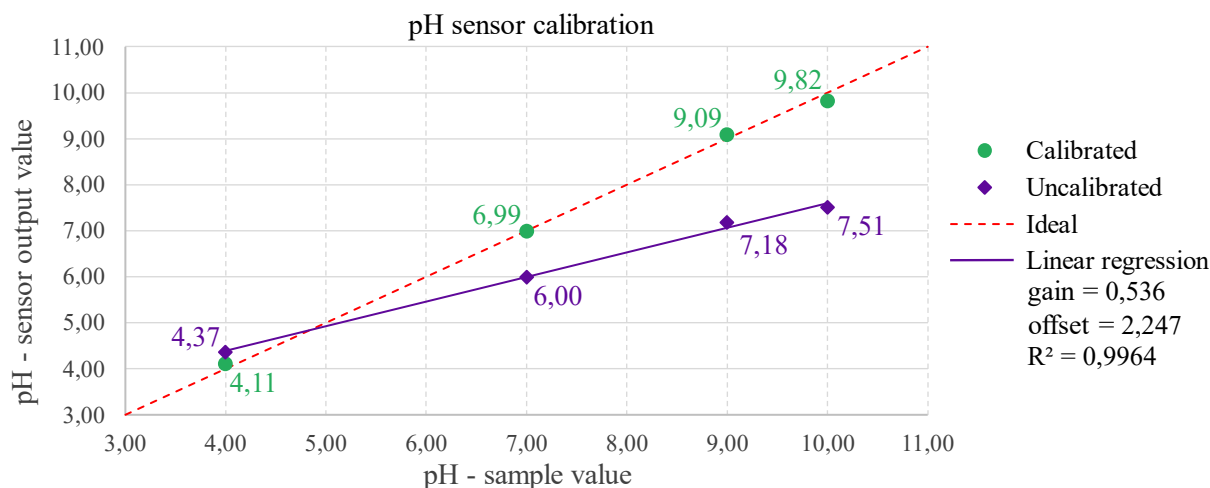
Závislosť odporu fotorezistora na intenzite svetla nie je lineárna, ale logaritmická. Postup ako spätne prepočítať analógovú hodnotu napätia na odpor fotorezistora a následne na intenzitu osvetlenia, ktorý bol použitý aj vo FW daného uzlu, je bližšie popísaný v [82]. Intenzita osvetlenia je uvedená v jednotkách lux, dátový typ je float a perióda vyčítania 500 ms.

6.3.4 Meranie koncentrácie CO2

Na obsluhu senzora MH-Z19B boli použité už existujúce knižnice. Aby sa snímaná hodnota ustabilizovala, potrebuje sa senzor na začiatku nahriať, čo môže trvať aj jednotky minút. Vývojová doska s ním komunikuje cez rozhranie UART, hodnota sa vyčítava raz za sekundu v jednotkách ppm a dátový typ je 16 bitový integer.

6.3.5 Meranie pH

Na kalibráciu pH senzora boli použité 4 roztoky s pH hodnotami 4, 7, 9 a 10 ± 1%. Namerané hodnoty pred kalibráciou boli preložené pomocou lineárnej regresie priamkou s koeficientom determinovanosti 0,9964. Smernica a offset boli následne použité pri kompenzácii chyby vo FW, a to jednoducho využitím inverznej lineárnej funkcie. Nízka presnosť pH sondy, ktorej parametre sú uvedené v Tab. 5.7, spôsobila, že ani po kalibrácii nie sú hodnoty ideálne. Dôležité však je, že sú presné v okolí pH 7 ÷ 9, kde možno očakávať aj pH média PBR.



Obr. 6.4) Kalibrácia pH senzora

6.3.6 Meranie zákalu

Kalibrácia senzora na meranie zákalu kvapaliny, ktorý sa udáva v jednotkách „Nephelometric Turbidity Unit“ (NTU), je komplikovaná a vyžaduje špecializované vybavenie. Navyše meranie zákalu pomocou senzora TS-300B je z princípu jeho funkcie ovplyvnené okolitými svetelnými podmienkami. Z týchto dôvodov bolo rozhodnuté, že pri meraní na PBR sa hodnota bude udávať ako bezrozmerné číslo s hodnotou 0 až 100, ktoré bude slúžiť skôr ako ukazovateľ relatívnej zmeny zákalu sledovaného média.

6.3.7 Meranie elektrického prúdu

Senzor prúdu ACS712 má lineárnu závislosť výstupného napätia na prúde. Kalibrácia bola realizovaná pomocou laboratórneho zdroja R&S HMP2020. Z nameraných hodnôt sa určila lineárna závislosť a chyba bola opäť kompenzovaná jednoduchou inverznou funkciou na úrovni FW.

7 Testovanie a integrácia častí systému

Posledná kapitola praktickej časti práce sa venuje testovaniu prenosovej rýchlosti NB-IoT technológie a parametrov navrhnutého riešenia. Ďalej popisuje „backend“ na strane AWS, implementáciu vlastného, hoci len základného používateľského rozhrania a zhrnutie výsledkov z demonštratívneho merania na fotobioreaktore (PBR).

7.1 Parametre NB-IoT technológie a navrhnutého riešenia

Meranie rýchlosti prenosu dát (data rate) a objemu pridaných dát (overhead) pri používaní novej technológie, v tomto prípade NB-IoT, je dôležité pri optimalizácii komunikácie, znižovaní nákladov a identifikácii obmedzení siete. Tieto znalosti sú nevyhnutné pre návrh a nasadenie efektívnych NB-IoT riešení, čo prispieva k úspechu celej aplikácie.

Pri kontrole formy pripojenia bolo zistené, že súčasťou predplatného IoT Easy Connect je aj možnosť pripojenia pomocou technológie EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), hoci to Vodafone v popise produktu explicitne neuvádza. V rámci meraní bude preto realizované aj porovnanie parametrov NB-IoT s parametrami technológie EDGE.

7.1.1 Data rate

V prvom kroku bude snaha zmerať rýchlosť prenosu samotnej NB-IoT siete. Data rate sa určí z času prenosu, ktorý je problematické zmerať bez sofistikovaných sieťových nástrojov. Z toho dôvodu bude čas prenosu meraný nepriamo z komunikácie medzi riadiacim mikrokontrolérom a RF modulom pomocou ľahko dostupného logického analyzátora.

Všeobecne sa dá očakávať, že prenos menšieho množstva dát bude rýchlejší ako prenos, kde je payload väčší. To však neznamená, že aj data rate bude automaticky vyšší, pretože ten sa spočíta na základe nasledujúcej rovnice:

$$dr = \frac{p_m}{t_a} [kB/s] \quad (2)$$

kde:

p_m [kB] veľkosť payloadu v 1 správe
 t_a [s] „air-time“

Aj keby bol čas prenosu „air-time“ pri menšom objeme dát kratší, môže sa stať, že na odoslanie rovnakého objemu dát, sa bude musieť odoslať viacero NB-IoT packetov. Inak povedané nemožno priamo odhadnúť, aká veľkosť payloadu bude optimálna na dosiahnutie najvyššieho data rate.

Príprava a postup merania

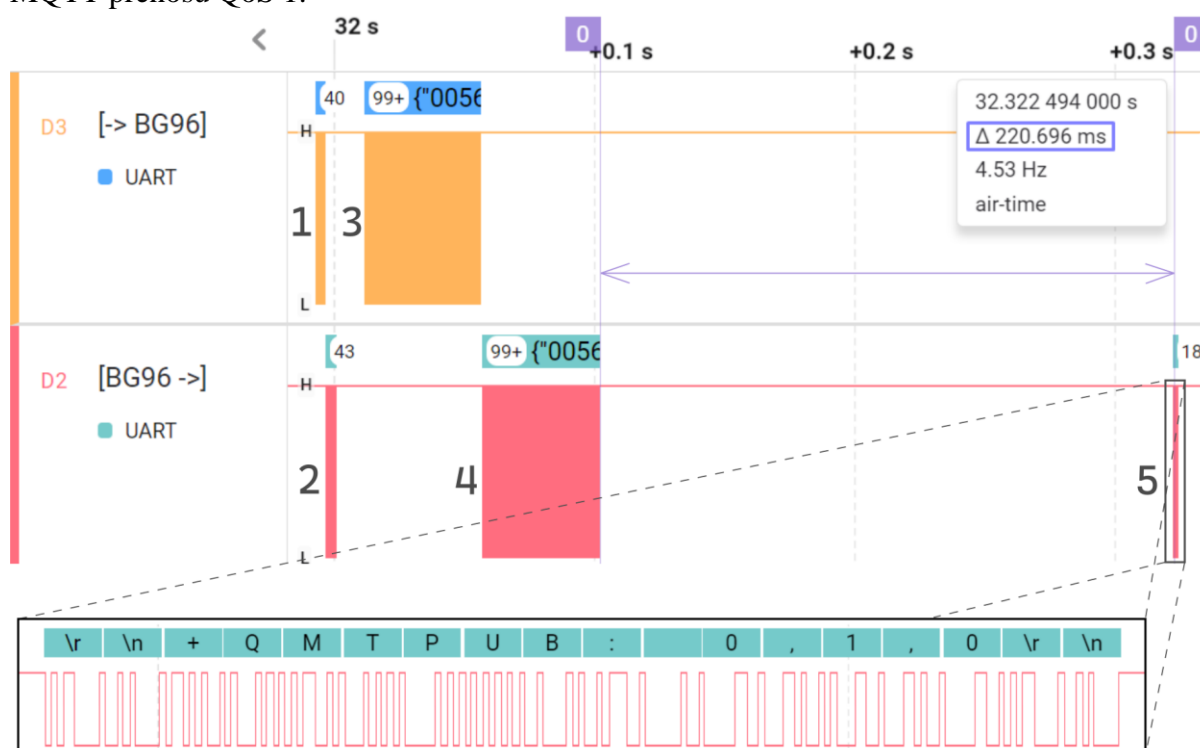
V tomto experimente bude meraných 100 hodnôt pre 3 rôzne veľkosti payloadu: 512 bajtov, 1024 bajtov a najväčší payload, čo RF modul Quectel BG96 umožňuje, 4096 bajtov.

Na obrázku Obr. 7.1 vidno komunikáciu medzi riadiacim mikrokontrolérom ESP32-C3 a RF modulom po zbernici UART, kde na horizontálnej osi je čas a na pomyselných vertikálnych osiach je logická úroveň signálu. Signál D3 (oranžový) zobrazuje príkazy, ktoré posiela kontrolér RF modulu. Odpoveď znázorňuje signál D2 (červený).

1 komunikačný cyklus pri úspešnom odoslaní MQTT správy na server má 5 krokov a vyzerá nasledovne:

- 1) Cyklus sa začína AT príkazom z kontroléra "AT+QMTPUB".
- 2) Následne RF modul odpovedá potvrdením príkazu a čaká na payload.
- 3) Mikrokontrolér pošle MQTT payload.
- 4) RF modul potvrdí príjem tým, že payload zopakuje.
- 5) Cyklus sa skončí potvrdením zo strany servera, kedy modul odpovie správou v tvare "+QMTPUB: 0,1,0". (Obr. 7.1 detail na dekódovaný UART packet)

Keďže RF modul Quectel BG96 má iba jednojadrový procesor, možno predpokladať, že samotný prenos dát cez NB-IoT sa začne po tom, ako RF modul potvrdí príjem payloadu. „Air-time“ v tomto konkrétnom prípade by bol 220,696 ms a zahŕňa nielen čas prenosu dát z RF modulu na cloud, ale tiež potvrdenie zo strany AWS servera, pretože je použitá úroveň MQTT prenosu QoS 1.



Obr. 7.1) 1 komunikačný cyklus medzi kontrolérom a RF modulom pri meraní data rate

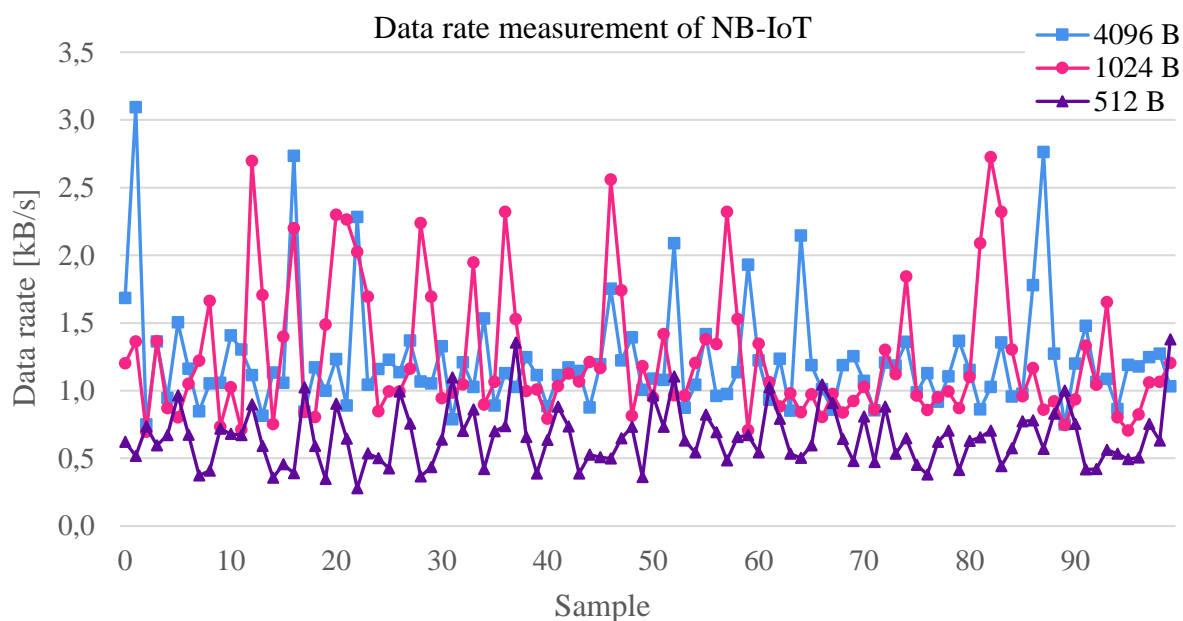
Výsledky merania

Hodnoty času prenosu boli prepočítané s využitím rovnice (2) na výsledný data rate pre jednotlivé prípady, kde sa líšila veľkosť payloadu. Z opísaného spôsobu akým bolo meranie realizované nemožno presne určiť aký podiel z „air-time“ trvalo odoslanie správy a aký čas trvalo potvrdenie jej príjmu. Preto bol použitý konzervatívnejší prístup a celý prenos sa označil ako čas odosielania správy (uplink). Pri všetkých 3 meraniach bola kvalita signálu RSSI 15, čo predstavuje výkon -83 dBm. Kvôli lepšej názornosti boli hodnoty data rate vykreslené do grafu na obrázku Obr. 7.2, kde na x osi vidno poradie odoslaných správ a na y osi je data rate. Celá tabuľka nameraných hodnôt je k dispozícii v prílohe Tab. 11.1) NB-IoT – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 15 (-83 dBm).

V prípade správ s veľkosťou payloadu 512 bajtov, bol priemerný air-time najkratší 848 ms, ale data rate bol najnižší s priemernou rýchlosťou prenosu $0,65 \pm 0,21$ kB/s.

Pri payloade 1024 bajtov, bol priemerný air-time 908 ms, čo nie je výrazná zmena. Objem odoslaných dát je však 2 násobný, čo sa prejavilo aj na data rate, ktorý bol v priemere $1,24 \pm 0,49$ kB/s.

Prenos payloadu 4 kB trval v priemere 3535 ms a priemerný data rate bol $1,22 \pm 0,41$ kB/s. Keďže objem dát aj perióda sú asi 4-krát väčšie ako v predošlom prípade, tak data rate je prakticky rovnaký.



Obr. 7.2) Experimentálne meranie data rate NB-IoT

Najvyšší uplink data rate **NB-IoT** deklarovaný pre špecifikáciu Cat-NB1 je 60 kb/s. Ak sa prepočíta hodnota z experimentu odosielania 1 kB na rovnaké jednotky, tak priemerná rýchlosť prenosu je $9,92 \pm 3,92$ kb/s, čo je asi šestina z maximálnej hodnoty.

Počas experimentu bolo zároveň zistené, že RF modul je schopný pripojiť sa do siete aj pomocou rádiovkej technológie (RAT – Radio Access Technology), ktorá sa označuje EDGE. Ak má modul možnosť, tak RAT si vyberá na základe vyššej kvality signálu.

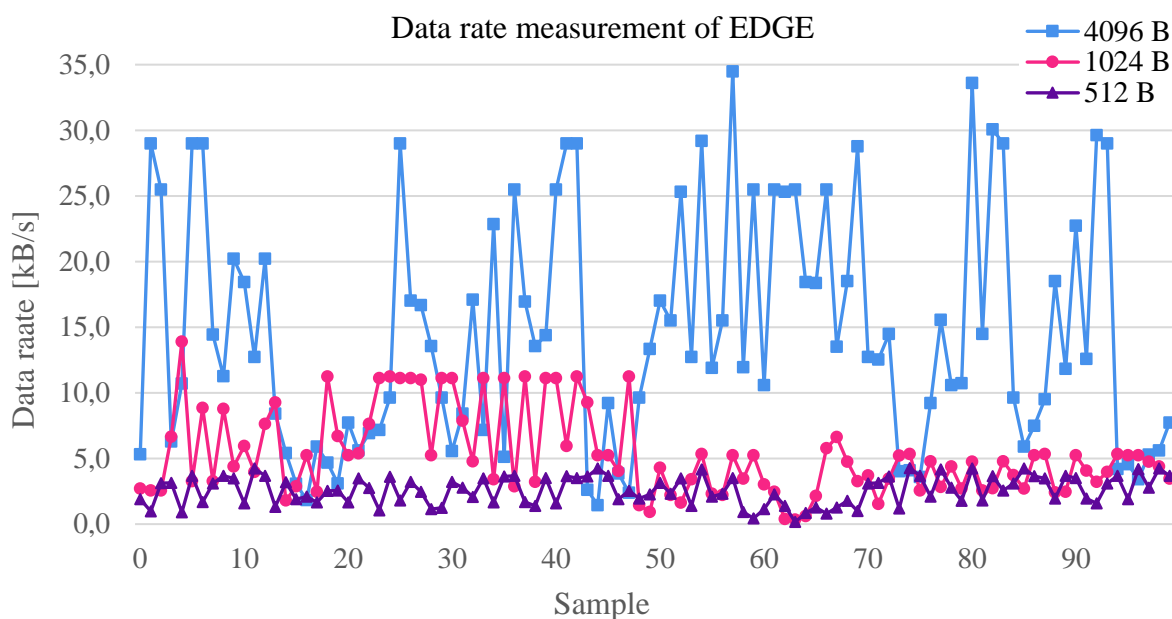
V rámci tohto experimentu preto bolo realizované aj druhé, prakticky úplne identické meranie, ale ktorého RAT bola EDGE a nie NB-IoT. Namerané hodnoty sú uvedené v prílohe Tab. 11.2) EDGE – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 26 (-61 dBm) a tiež vykreslené v grafe Obr. 7.3.

Pri payloade 512 bajtov, bol priemerný air-time najkratší 273 ms a data rate bol opäť najnižší s priemernou rýchlosťou prenosu $2,57 \pm 1,08$ kB/s.

Pri prenose payloadu 1024 bajtov, bol priemerný air-time 318 ms a data rate $5,31 \pm 3,20$ kB/s.

Prenos payloadu 4 kB bol len o niečo dlhší, v priemere 469 ms, a preto na rozdiel od NB-IoT bol najvyšší data rate v tomto prípade. V priemere až $14,51 \pm 8,96$ kB/s. V maxime dosahoval rýchlosť cez 34 kB/s, ale ako naznačuje smerodajná odchýlka, jeho hodnota veľmi výrazne kolísala.

Technológia EDGE by mala teoreticky poskytovať maximálnu uplink rýchlosť až 236 kb/s. Priemerná rýchlosť z prenosu 4kB cez **EDGE** je **116 kb/s**, čo je skoro 12-krát viac ako pri NB-IoT, avšak pri ich vzájomnom porovnaní si treba uvedomiť, že v prípade EDGE bola kvalita signálu RSSI 26 (-63 dBm), a teda až 158-krát vyššia ako pri NB-IoT.



Obr. 7.3) Experimentálne meranie data rate EDGE

Zároveň, v prípade oboch technológií treba brať do úvahy viaceré nedokonalosti tohto experimentu. Okrem zníženej kvality signálov hlavne skutočnosť, že meraný interval zahŕňal aj čas odpovede zo strany cloudu, ktorá môže byť závislá na vyťažení serverov a teoreticky aj od toho, v akej časti dňa sa meranie realizovalo. Snahou tohto jednoduchého experimentu však bolo získať aspoň hrubý odhad prenosového času a rýchlosti NB-IoT v daných podmienkach, čo sa týka HW vybavenia, cloudovej služby aj fyzickej polohy zariadenia.

7.1.2 Overhead a throughput

Z technického aj komerčného hľadiska je dôležité vedieť aké množstvo pridaných dát, „**overhead**“ mimo známeho payloadu sa vymení v rámci komunikácie medzi RF modulom a serverom. Tieto dáta sú nevyhnutné pretože zabezpečujú prenos žiadaného payloadu na jednotlivých vrstvách komunikačného protokolu, ale ich veľkosť má priamy vplyv na spotrebu dátového balíka v rámci predplatného pripojenia do siete. Poskytovateľ pripojenia nerobí rozdiel medzi tým, aké množstvo tvoria užívateľské dáta a aká časť je potrebná na obsluhu použitých protokolov. Z dátového balíka sa vždy spotrebuje objem dát predstavujúci ich súčet.

Určovať overhead výlučne prostredníctvom výpočtov je veľmi náročné a to z rôznych dôvodov. Okrem toho, že by bolo potrebné poznať všetky vrstvy, ktorými dátový packet prechádza a špecifikácie protokolov na jednotlivých vrstvách OSI modelu, veľkosť overhead sa môže ešte aj meniť v závislosti od kvality signálu, RF podmienkach prenosu a pod.

Za účelom určiť približnú veľkosť overhead je možné spraviť jednoduchý priamočiary experiment a to tak, že na AWS server bude poslaný známy objem dát, payload a s pomocou Vodafone portálu, ku ktorému získa zákazník prístup po zakúpení IoT Easy Connect služby sa dá vyčítať, aké množstvo dát sa z tarify naozaj spotrebovalo. Po reloade webového rozhrania portálu sa navyše v priebehu niekoľkých sekúnd aktualizuje spotreba dát, čo umožňuje určiť, v akom čase a koľko z predplatného sa použilo. Možno tak odčítať, aký objem dát sa spotrebuje

pri autentifikácii modulu voči serveru, koľko dát sa vymení počas samotnej komunikácie a nakoniec pri zatvorení PDP kontextu.

Súčasťou merania bude opätovné určenie data rate, ale z iného pohľadu. Kým v predošlom prípade sa prakticky overoval čas prenosu, „air-time“ v sieti NB-IoT, tentoraz bude meraný „throughput“ z pohľadu implementácie ovládacieho algoritmu a implementácie vlastnej knižnice na obsluhu RF modulu. Výsledok tak bude priamo závislý na vlastnostiach systému ako clock speed mikrokontroléra, baud rate UART zbernice a konfigurácii FreeRTOS. Z praktického hľadiska ide o dôležitejší parameter, keďže nielen „airtime“ ale aj návrh riadiaceho algoritmu má vplyv na reálny throughput a navyše ho možno optimalizovať.

Príprava a postup merania

Počas experimentu bolo realizovaných 10 meraní a v každom sa odosielal 1 MB payload. Pri prvých 5 meraniach sa odosielalo 4096 bajtov (4kB) dát payloadu 256 krát, pri druhej polovici 1024 bajtov (1kB) 1024 krát. A aby bolo určenie overhead presnejšie, k payloadu sa započítava aj dĺžka MQTT topic, pretože to je ďalší a zároveň posledný parameter, ktorého dĺžku pri komunikácii so serverom cez MQTT protokol možno ovplyvniť a musí byť súčasťou payloadu. Použitý topic "testUploadOverhead" má 18 ASCII znakov, čo predstavuje 18 bajtov.

Podobne ako v predošlom prípade je potrebné v rámci firmwaru nastaviť veľkosť správy na 1024 alebo 4096 a ich počet sa dopočíta automaticky tak, aby celkový payload bol 1 MB. FreeRTOS task zároveň meria časový interval ako dlho bude trvať odoslanie všetkých správ, aby bolo možné vyhodnotiť spomínaný throughput.

Mimo zmien v nastavení firmwaru sa z hľadiska jednotlivých meraní opakoval nasledujúci postup, ktorý sa týka vyčítania spotreby z webového rozhrania Vodafone portálu:

1. Reload webového rozhrania po spustení daného merania.
Vybrať príslušnú SIM kartu a zaznamenať spotrebu dát aktuálne otvorenej session. Táto spotreba dát predstavuje zatiaľ iba otvorenie spojenia medzi modulom a serverom: s_0
2. Počkať na prenos 1MB payloadu.
3. Opätovný reload webového rozhrania a ďalšie zaznamenanie aktuálnej spotreby dát, ktoré predstavuje otvorenie session a n-krát samotný payload (user data) s pridaným overhead ku každej správe: $s_0 + n \cdot (msg_{UD} + msg_{OH})$
4. Reštart / vypnutie zariadenia, čím sa zatvorí aktuálny PDP kontext.
5. Posledný reload portálu a zaznamenanie celej spotreby dát, už ukončenej session:
 $s_0 + n \cdot (msg_{UD} + msg_{OH}) + s_c$

Výsledky merania

Otvorenie novej session, v rámci ktorej prebieha zabezpečená SSL/TLS komunikácia medzi zariadením a AWS serverom zahŕňa výmenu certifikátov a kľúčov. Zariadenie sa autentifikuje serveru pomocou certifikátu „device certificate“ a následne nastáva vzájomná výmena verejných kľúčov „public keys“ zariadenia aj serveru, pomocou ktorých si správy šifrujú. Ich dekódovanie zabezpečuje „private key“, ktorý má lokálne uložený modul aj server.

Celý objem dát vymenených pri otvorení komunikácie priamo predstavujú hodnoty s_0 určené z bodu číslo 1.

Objem dát pri zatvorení komunikačnej session je potrebné dopočítať jednoduchým odčítaním hodnôt z bodu číslo 3, ktoré reprezentujú objem dát pred ukončením session, od hodnôt z bodu číslo 5, ktoré predstavujú spotrebu celej session.

Tab. 7.1) Spotreba dát pri otvorení a zatvorení „session“ kontextu

| Meranie | Otvorenie „session“ | Zatvorenie „session“ |
|---------------------|---------------------|----------------------|
| | $s_o [kB]$ | $s_c [kB]$ |
| 1 | 8,43 | 0,12 |
| 2 | 9,32 | 0,12 |
| 3 | 8,31 | 0,55 |
| 4 | 9,43 | 0,08 |
| 5 | 9,13 | 0,40 |
| 6 | 9,21 | 0,05 |
| 7 | 14,99 | 0,01 |
| 8 | 9,32 | 0,09 |
| 9 | 14,06 | 0,12 |
| 10 | 8,43 | 0,19 |
| Priemer | 10,06 | 0,17 |
| Smerodajná odchýlka | 2,27 | 0,16 |

Výsledkom meraní je, že priemerná spotreba dát pri otvorení zabezpečenej komunikácie s AWS serverom je **10,06 ± 2,27 kB** a pri zatvorení **0,17 ± 0,16 kB**. Tieto hodnoty budú použité pri určení overhead dát pripadajúcich na 1 správu.

Ak sa každá správa skladá z používateľských dát a pridaného overhead, tak platí:

$$msg = msg_{UD} + msg_{OH} [kB] \quad (3)$$

kde:

$msg_{UD} [kB]$ veľkosť používateľských dát v 1 správe

$msg_{OH} [kB]$ veľkosť overhead 1 správy

Celkový overhead je jednoducho rozdiel celkového objemu minútých dát a objemu používateľských dát, ktoré zahŕňajú aj spomínanú veľkosť topicu. Overhead jednej správy sa teda vypočíta pomocou rovnice (4):

$$msg_{OH} = \frac{s_F - s_o - s_c}{n_{msgs}} - msg_{UD} [kB] \quad (4)$$

kde:

$s_F [kB]$ celkový objem minútých dát počas 1 session

$s_o [kB]$ priemerný objem dát spotrebovaný na otvorenie session (10,06 kB)

$s_c [kB]$ priemerný objem dát spotrebovaný na zatvorenie session (0,17 kB)

$n_{msgs} [-]$ počet odoslaných správ počas 1 session (256 alebo 1024)

A keďže čas prenosu sa meria až od prvého payloadu po ukončenie prenosu všetkých payloadov, throughput sa v tomto prípade vypočíta nasledujúcim spôsobom:

$$th = \frac{s_F - s_o - s_c}{t} [kB/s] \quad (5)$$

kde:

$t [s]$ čas prenosu

Tabuľka Tab. 7.2 zobrazuje namerané a dopočítané hodnoty z prvých 5 meraní, kedy sa zo zariadenia odosiela 256 správ s payloadom 4 kB na topic veľkosti 18 B a hodnoty v tabuľke Tab. 7.3 sa týkajú meraní počas odosiela 1024 správ s payloadom 1 kB na rovnaký MQTT topic.

Tab. 7.2) NB-IoT – Overhead pri prenose 1MB dát v 256 správach s payload 4 kB

| Meranie | Celkový objem dát v 1 „session“ s_F [kB] | Čas prenosu t [s] | Celkový overhead [kB] | Overhead 1 správy msg_{OH} [kB] | Throughput th [kB/s] |
|-----------------|---|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 1320,91 | 1099,83 | 292,40 | 1,10 | 1,19 |
| 2 | 1286,64 | 1108,65 | 258,13 | 0,97 | 1,15 |
| 3 | 1298,37 | 1214,46 | 269,86 | 1,01 | 1,06 |
| 4 | 1281,64 | 1183,05 | 253,13 | 0,95 | 1,07 |
| 5 | 1278,85 | 1289,17 | 250,34 | 0,94 | 0,98 |
| Priemer | 1293,28 | 1179,03 | 264,78 | 0,99 | 1,09 |
| Smerodaj. odch. | 15,34 | 70,18 | 15,34 | 0,06 | 0,07 |

Tab. 7.3) NB-IoT – Overhead pri prenose 1MB dát v 1024 správach s payload 1 kB

| Meranie | Celkový objem dát v 1 „session“ s_F [kB] | Čas prenosu t [s] | Celkový overhead [kB] | Overhead 1 správy msg_{OH} [kB] | Throughput th [kB/s] |
|-----------------|---|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 1255,05 | 1152,81 | 213,03 | 0,20 | 1,08 |
| 2 | 1246,83 | 1169,00 | 204,81 | 0,19 | 1,06 |
| 3 | 1267,46 | 1242,18 | 225,44 | 0,21 | 1,01 |
| 4 | 1261,08 | 1059,56 | 219,06 | 0,20 | 1,18 |
| 5 | 1258,16 | 1173,24 | 216,14 | 0,20 | 1,06 |
| Priemer | 1257,72 | 1159,36 | 215,69 | 0,20 | 1,08 |
| Smerodaj. odch. | 6,81 | 58,56 | 6,81 | 0,01 | 0,06 |

Na základe nameraných hodnôt vidno, že veľkosť overhead je závislá nielen na celkovom objeme odosielaných dát ale tiež na tom, v ako veľkých packetoch sa posielajú. Pri použití technológie **NB-IoT** a packetoch veľkosti 4 kB je z 5 meraní celkový overhead v priemere $264,78 \pm 15,34$ kB, čo predstavuje asi 26 %, teda viac ako štvrtinu dát navyše. Pri packetoch veľkosti 1 kB je z 5 meraní celkový overhead nižší, konkrétne $215,69 \pm 6,81$ kB, čo je asi 21 % minútého objemu dát. Celkový throughput je v oboch prípadoch takmer identický, približne $8,71$ kb/s, teda o 1,21 kb/s menej, ako priemerný data rate NB-IoT meraný v kapitole 7.1.1.

Rovnako ako pri meraní data rate, aj v tomto prípade bol experiment identicky opakovaný s technológiou EDGE. Hodnoty sú uvedené v prílohách Tab. 11.3 a Tab. 11.4.

Celkový overhead pri použití technológie **EDGE** a odosiela 5 packetov veľkosti 4 kB je v priemere $178,83 \pm 21,46$ kB, čo predstavuje asi 17 % pridaných dát. Pri packetoch veľkosti 1 kB je z 5 meraní celkový overhead vyšší, konkrétne $236,01 \pm 9,25$ kB, čo predstavuje 23 % minútého objemu dát.

Zároveň je výsledkom nielen vyššia spotreba pri odosielaní 1 MB dát v 1 kB packetoch, ale celkový throughput je pri menšom payloade pre EDGE nižší. Pri odosielaní 4 kB správ bol čas prenosu trochu dlhší ako 5 minút a skutočný throughput bol $3,88 \pm 0,18$ kB/s. To je skoro o 29 % rýchlejšie oproti druhému prípadu, kde čas prenosu bol okolo 7 minút a výsledný throughput bol $3,01 \pm 0,19$ kB/s.

Medzi odosielaniami samozrejme nebolo žiadne umelé SW oneskorenie. Dáta sú nachyšané vo FreeRTOS queue a odosielajú sa tak rýchlo ako je to možné. Opäť si však treba uvedomiť, že nejde iba o limitáciu zo strany siete, ale aj zo strany obsluhy RF modulu a celkový návrh riadiaceho algoritmu implementovaného v mikrokontroléri ESP32-C3.

Výsledky pri NB-IoT ukazujú, že z hľadiska overhead je výhodnejšie odosielenie správ s payloadom 1 kB ako 4 kB. Hodnoty throughputu však možno interpretovať tak, že samotný prenos dát a potvrdenie ich príjmu zaberie 87 % času a iba 13 % času je potrebných na obsluhu RF modulu a iných záležitostí týkajúcich sa firmwaru.

Pri použití prístupu pomocou rádio technológie EDGE je výhodnejšie odosielenie dát v packetoch s väčším payloadom, pretože sa tak znižuje overhead a hlavne výrazne zvyšuje throughput. Z toho dôvodu by v tomto prípade malo väčší zmysel zaoberať sa úpravami firmwaru. Výsledky ukazujú, že „airtime“ zaberá iba 27 % času a zvyšných 73 % možno ovplyvniť optimalizáciou riadiaceho algoritmu.

7.2 Integrácia s cloudovou platformou

Po overení základnej funkcionality a meraniach parametrov navrhnutého systému, nasledovala implementácia backend časti aplikácie využitím služieb Amazon Web Services, ktoré boli všeobecne popísané v kapitole 2.3.2.

Diagram na Obr. 7.4 zobrazuje dátový tok medzi použitými službami, a prepojenie backendu s NB-IoT koncentrátorom a používateľskou aplikáciou.

Ľavá spodná časť nadväzuje na diagram Obr. 6.3 a odkazuje na MQTT komunikáciu s cloudovou platformou cez NB-IoT sieť. Ďalšie očíslované prvky diagramu v tomto prípade však nepredstavujú chronologický prenos informácií, ale označujú jednotlivé AWS služby, ktoré sú nižšie konkrétne opísané.

Základ aplikácie tvorí služba AWS IoT Core zabezpečujúca registráciu nových IoT zariadení a vygenerovanie potrebných autentifikačných kľúčov. Služba má vlastný „endpoint“, ktorý sa viaže na konkrétny účet a región, ale v princípe ide len o URL adresu, pomocou ktorej môžu iné časti AWS pristupovať k tejto službe cez internetový protokol. Jej ďalšie úlohy a časti sú nasledovné:

1) AWS IoT Core – Služba poskytuje brokera, ktorý je nevyhnutnou súčasťou komunikácie cez MQTT s NB-IoT koncentrátorom. Súčasťou služby sú tzv. pravidlá (IoT Rule **2**) a **3**), ktoré zaobchádzajú s prichádzajúcimi payloadmi.

2) IoT Rule "selectIotData" – Pravidlo preposiela merané senzorické dáta a do ich JSON objektov pridáva kľúč "timestamp" s hodnotou časového okamihu v unixovom tvare, kedy dáta prišli. Následne invokuje Lambda funkcie **4**) a **5**).

3) IoT Rule "selectMmtPeriod" – Pravidlo pridáva do JSON objektu kľúč "topic" s hodnotou "BG96_demoThing/mmtPeriods/response" čím informuje, že payload obsahuje periódu merania daného senzora.

Prepojenie služieb zabezpečujú AWS Lambda funkcie. Pri ich definovaní v AWS si možno zvoliť v akom programovacom jazyku budú písané, pričom v tejto aplikácii bol použitý Python 3.9.

4) **Lambda "storeIntoCsv"** – Lambda funkcia naformátuje informácie z JSON objektu do požadovaného tvaru a uloží ich do S3 bucketu. Každý riadok CSV súboru má tvar: "`<nodeName>; <sensorName>; <physicalQuantity>; <value>; <timestamp>`". Formát cesty a názov súboru je: "`mqtt_data/<year>/<month>/<day>/<hour>.csv`".

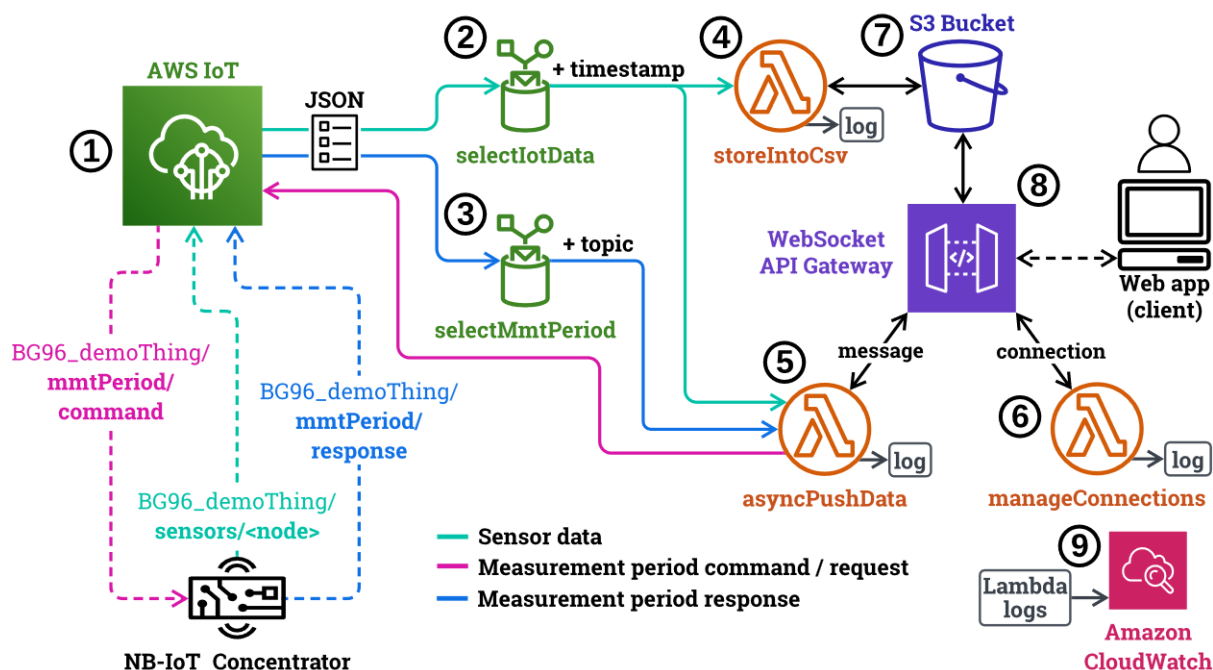
5) **Lambda "asyncPushData"** – Funkcia odosiela cez API bránu JSON objekty so sensorickými dátami alebo periódou merania, všetkým aktívne pripojeným klientom. Proces prebieha asynchrónne, vďaka čomu má klient možnosť aktualizovať real-time dáta v okamihu akonáhle prídu.

6) **Lambda "manageConnections"** – Pridáva nových klientov do zoznamu aktívnych pripojení.

7) **S3 Bucket** – S3 bucket poskytuje úložisko. Pre ostatné služby sa tvári ako obyčajný súborový systém, ku ktorému prístupujú cez jeho endpoint.

8) **WebSocket API Gateway** – AWS API Gateway je brána medzi backendom a klientom, ktorým môže byť napríklad webová aplikácia. Pri použití protokolu WebSocket definuje brána tzv. „routes“. „Connection route“ v tomto prípade automaticky invokes lambda funkciu 6), keď sa pripojí klient na endpoint brány a „message route“ lambda 5), keď chce klient odoslať MQTT správu koncentrátoru.

9) **Amazon CloudWatch** – Služba zbiera a zobrazuje logy z Lambda funkcií, čím uľahčuje debugging pri prepájaní jednotlivých služieb.



Obr. 7.4) AWS – backend navrhutej aplikácie

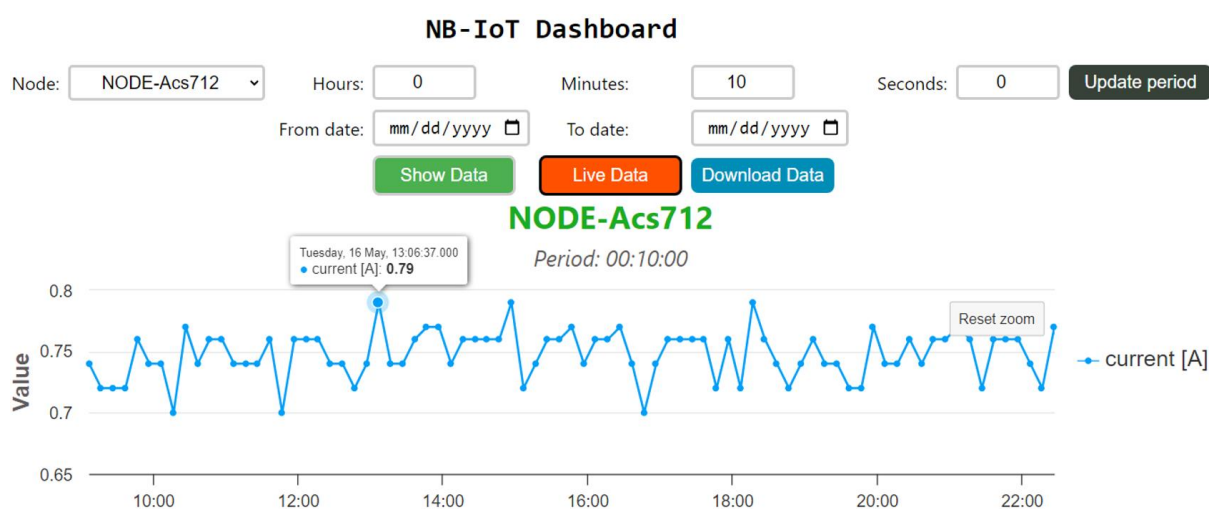
7.3 Používateľské rozhranie

Na tvorbu používateľského rozhrania ponúka AWS vlastné nástroje, ako napríklad AWS IoT Analytics a službu Amazon QuickSight na vizualizáciu dát z IoT senzorov.

Ďalšou z často používaných možností je kombinácia nástrojov Node-RED, InfluxDB a Grafana. Dôvodom je, že programovací nástroj Node-RED, umožňuje prepájať rôzne časti SW a APIs (vrátane AWS) vo vizuálnom, „drag-and-drop“ webovom rozhraní. InfluxDB je „time series“ databáza optimalizovaná na ukladanie hodnôt aj časových údajov a pomocou nástroja Grafana sa ľahko vytvárajú prispôsobiteľné dashboards. Spolu tak poskytujú možnosť rýchlo a nenáročne vizualizovať dáta z meraní, a to s minimálnou potrebou písania zdrojového kódu.

Za účelom získania nových skúseností s programovacími jazykmi určenými na webový vývoj však bolo zvolené iné riešenie. Jeho výsledkom je používateľské rozhranie, ktoré predstavuje pomerne jednoduchú, ale vlastnú webovú aplikáciu „NB-IoT dashboard“ napísanú pomocou jazykov HTML, CSS a JavaScript s využitím knižníc AWS SDK a Highcharts.

Aplikácia má 2 módy. V móde „Live Data“ (Obr. 7.5) vizualizuje real-time hodnoty aktuálne pripojených sensorických uzlov a periódu s akou merajú dáta. Zároveň tento mód umožňuje používateľovi nastaviť jednotlivým uzlom periódu s rozlíšením 5 sekúnd.



Obr. 7.5) Webové rozhranie v „Live Data“ móde

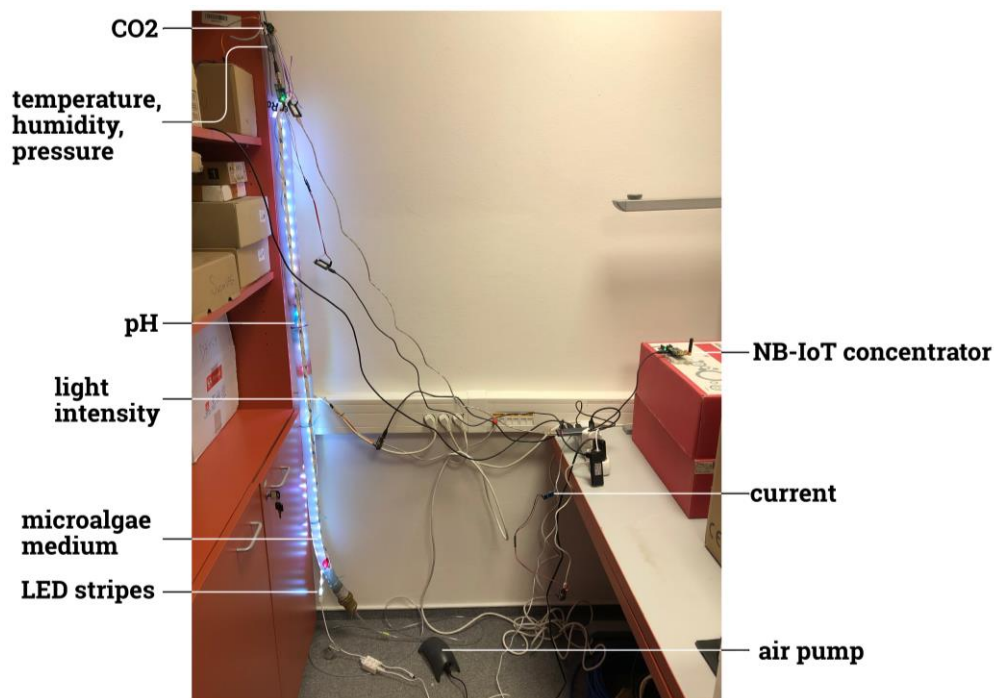
V móde „Show Data“ sa vykreslia hodnoty zo všetkých sensorov, ktoré merali dáta v časovom rozmedzí, ktoré používateľ špecifikuje v hornej časti webovej stránky (Obr. 7.7), pričom vyfiltrované dáta môže následne stiahnuť z cloudu ako CSV súbory v rovnakej forme, ako sú uložené v S3 Bucket.

7.4 Testovacie meranie na fotobioreaktore

Správne nasadenie technológie NB-IoT, odosielanie a príjem správ, overenie funkčnosti jednotlivých sensorov, vizualizácia hodnôt vo webovom rozhraní a celková demonštrácia navrhnutého riešenia bola realizovaná na laboratórnom PBR, ktorý vidno na obrázku Obr. 7.6.

Použitý PBR je v značne zjednodušenom prevedení, neobsahuje oddelený rezervoár na pestovanie mikrorias ani vodné čerpadlo, keďže ide o otvorený systém. Médium sa pestuje priamo v priehľadnej trubici, ktorá je umelo osvetlená, zospodu do nej vháňa čerpadlo vzduch a v hornej časti je uchytená. Zároveň sa pri otvorení nachádzajú senzory koncentrácie CO₂, teploty, tlaku a vlhkosti. Vzhľadom k prevedeniu PBR a relatívne rýchlo sa meniacej výške hladiny nebolo možné použiť zvolený senzor zákalu. Sonda pH je ponorená priamo v médiu, intenzita osvetlenia sa meria v tesnej blízkosti trubice a senzor elektrického prúdu sníma prúd

tečúci zdrojom osvetlenia. V miestnosti s PBR sa počas pracovných dní nachádzali aj ďalšie osoby.



Obr. 7.6) Demonštrácia navrhnutého riešenia na laboratórnom PBR

Meranie prebiehalo 13 dní, od 4. do 16. mája 2023 s konštantnou periódou merania 10 minút, nastavenou pre každý senzorický uzol. Na obrázku Obr. 7.7 sú vykreslené grafy nameraných priebehov zo 4 senzorických uzlov.

Na grafe snímania teploty, tlaku a vlhkosti (Obr. 7.7 – NODE-BME280) vidno, že senzor bol počas prvého dňa umiestnený príliš blízko hladiny, čo v istom okamihu spôsobilo, že na jeho povrchu skondenzovala kvapalina, relatívna vlhkosť dosiahla limit 100 % a teplota ukazovala nereálne hodnoty. Senzor bolo potrebné umiestniť ďalej od hladiny a snímané hodnoty sa následne ustabilizovali. Zároveň si možno všimnúť, že priebeh vlhkosti mierne koreluje s koncentráciou CO₂ a je ovplyvnený prítomnosťou ľudí v danej miestnosti.

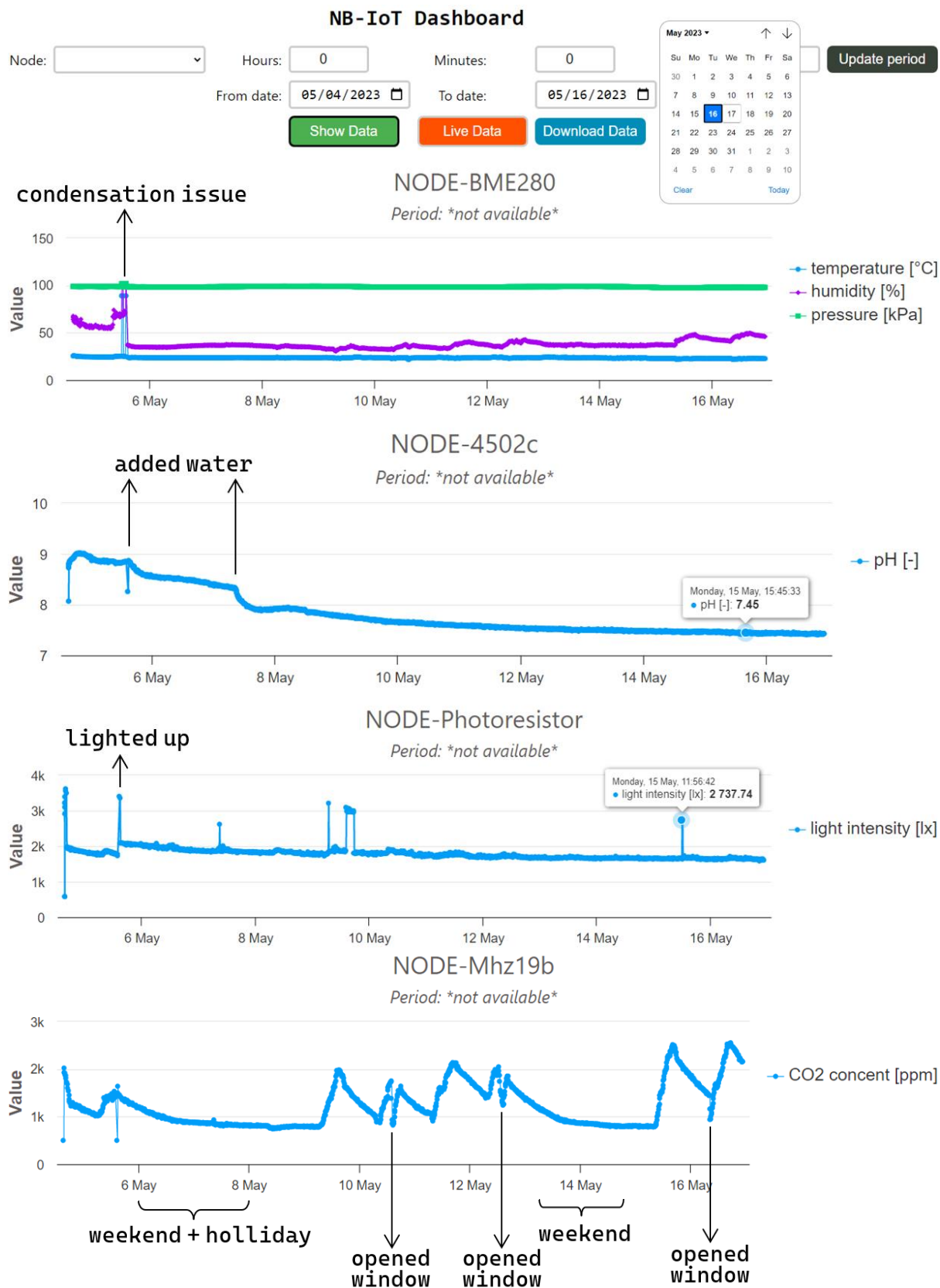
Na priebehu grafu pH vidno 2 okamihy, kedy musela byť doplnená voda do systému, pretože sa rýchlo odparovala. Najskôr po prvom dni a tiež po ďalších dvoch. Hodnota pH výraznejšie klesla, ale v priebehu nasledujúcich dní sa ustabilizovala na hodnote okolo 7,45.

Graf hodnôt elektrického prúdu nie je vykreslený, pretože bol viac menej konštantný. Hodnota prúdu prechádzajúca zdrojom svetla sa pohybovala v rozmedzí 0,62 ÷ 0,78 A.

Fotorezistor monitoroval akoby len 2 stavový priebeh. V čase, kedy bol PBR osvetlený iba LED pásikom, je meraná intenzita okolo 1800 lux iba mierne ovplyvnená svetelnými podmienkami z vonku, pretože naň nedopadalo svetlo cez okno. V okamihoch, kedy bolo v danej časti miestnosti rozsvietené, vidno intervaly s hodnotami 2700 ÷ 3400 lux.

Zaujímavý priebeh možno pozorovať na hodnotách koncentrácie CO₂ (Obr. 7.7 – NODE-Mhz19b). V grafe vidno úseky počas víkendov a sviatku, kedy je koncentrácia nízka, okolo 800 ppm. Počas pracovných dní sa periodicky opakujú podobné vzorce. Od rána koncentrácia CO₂ postupne narastá. Maximum dosahuje v okolí hodnôt 2000 ÷ 2400 ppm. V okamihu, kedy sa otvorením okna vyvetrá, prudko klesne, ale po chvíli sa vráti na predošlú hodnotu a po odchode ľudí z práce opäť klesá.

Počas 13 dní merania sa spotrebovalo 4,338 MB z predplatného, čo predstavuje asi 0,42 %. Pri takomto návrhu (5 senzorov, 7 meraných veličín, odosielanie každých 10 minút) by dátový balík vystačil približne na 8 rokov a 5 mesiacov.



Obr. 7.7) Namerané hodnoty na PBR počas 13 dní zobrazené vo webovom rozhraní

8 Záver

Nasadenie sofistikovanejšej IoT aplikácie sa dnes nezaobíde bez znalosti potrebných softwarových nástrojov, hardwarových komponentov, ani dostupných komunikačných technológií. Mnohé riešenia sa navyše spoliehajú na veľké komerčné platformy, ktoré za spoločnosti preberajú zodpovednosť bezpečne a dlhotrvajúco uchovávať ich digitálne dáta v cloude. Pred návrhom každej IoT aplikácie je potrebné zvážiť celý rad dostupných možností a zvoliť ich vhodnú kombináciu.

Cieľom diplomovej práce je aplikovať komunikačnú rádiový frekvenčnú technológiu NB-IoT. Aplikácia pozostáva z návrhu technologického demonštrátora, ktorý má obsahovať NB-IoT koncentrátor a senzorické uzly, ktorých dáta sa budú odosielať na zvolenú cloudovú platformu.

Teoretická časť diplomovej práce uvádza čitateľa do problematiky rádiový frekvenčných LPWA sietí. Zameriava sa na štandard technológie NB-IoT a opisuje jej alternatívy s dôrazom na praktickú použiteľnosť a dostupnosť v našom regióne. Súčasťou rešerše je prehľad IoT platforiem a komunikačných protokolov. Zohľadňujúc prácu na vývoji jednotlivých častí projektu, je pri opise použitých technológií snaha postupovať chronologicky.

Spojenie teórie s praktickou časťou práce poskytuje kapitola 3 Definícia úlohy, ktorá v tejto fáze ponúka len všeobecný koncept spracovania daného problému. Dôležité však je, že dáva do súvislosti technológie popísané v rešerši a naznačuje, akým spôsobom budú jednotlivé časti prepojené vo výslednom riešení. Odôvodnenie voľby konkrétnych častí technologického demonštrátora popisuje kapitola 4 Vlastná špecifikácia úlohy.

Ako technologický demonštrátor bol zvolený laboratórny fotobioreaktor, ktorý poskytol vhodný systém na nasadenie NB-IoT a umožnil snímať mnoho parametrov, ako napríklad teplotu, tlak, intenzitu osvetlenia, koncentráciu CO₂, pH pestovaného média a elektrický prúd. Na zber meraných dát bola vybraná cloudová platforma Amazon Web Services, ktorá nie je zvyčajne používaná na účely menších projektov, ale vďaka množstvu služieb a možnostiam škálovania sa často vyskytuje v komerčných riešeniach IoT. Bližšie zoznámenie sa s touto platformou tak môže poskytnúť užitočnú skúsenosť pre budúce projekty. Keďže zadanie práce nekladie konkrétne požiadavky na spôsob výmeny informácií medzi koncentrátorom a senzorickými uzlami, bola zvolená sieť BLE mesh. Bezdrôtová komunikácia na lokálnej úrovni uľahčí škálovanie aplikácie, pretože umožní pridávať ďalšie senzory bez potreby fyzického prepojenia s NB-IoT koncentrátorom.

Samotný proces nasadenia technológie NB-IoT sa začal predplatením tarify IoT Easy Connect od poskytovateľa Vodafone. V úvodnej fáze aplikácie boli vybrané senzory a vývojová platforma. Riadiaci modul ESP32-C3 poskytol požadovaný výkon, periférie a konektivitu za nízku cenu. Pri výbere hardwaru bol na komunikáciu s cloudom zvolený modul Quectel BG96. Rádiový frekvenčný modul však nebol súčasťou vývojovej dosky a z toho dôvodu bola navrhnutá, osadená a po pár pokusoch aj úspešne oživená vlastná doska plošných spojov.

Dôvod, prečo by bolo vhodné zvážiť použitie inej vývojovej platformy ako Espressif, aj napriek vyšším nákladom, je hlavne v implementácii komunikácie cez BLE mesh. Pri spätnom pohľade framework ESP-IDF zatiaľ neposkytuje dostatočne rozsiahlu dokumentáciu, a tak, zo subjektívneho hľadiska, išlo o najnáročnejšiu časť projektu.

Hlavnú časť diplomovej práce, firmware embedded zariadení, bola snaha navrhnuť so zreteľom na modularitu a rozšíriteľnosť. Pri implementácii firmwaru koncentrátora bol použitý operačný systém FreeRTOS. Návrh riadiaceho algoritmu bol realizovaný tak, aby bol nezávislý na iných častiach systému a nebolo potrebné ho meniť pri pridávaní nových senzorických uzlov. Vlastný firmware má aj 6 riadiacich dosiek obsahujúcich rôzne senzory, pričom všetky komunikujú s NB-IoT koncentrátorom, ktorý je, ako jediný uzol lokálnej siete, schopný odosielať dáta na cloud.

Okrem cieľov definovaných v zadaní je riešenie rozšírené o testovanie parametrov komunikácie prostredníctvom technológie NB-IoT a protokolu MQTT so serverom AWS. Aj keď realizovaný experiment má niekoľko nedostatkov, poskytol približné hodnoty dôležitých parametrov siete. Priemerný throughput je v priemere $8,71 \pm 0,56$ kb/s a overhead v každej odosielanej správe predstavuje približne 21 % objemu minutých dát. Výsledky ukazujú, že z hľadiska optimalizácie spotreby dátového balíka je najvýhodnejšie odosielanie správ s payloadom veľkosti 1 kB. Z pohľadu throughputu pripadá na samotný prenos dát a potvrdenie ich príjmu asi 87 % času z komunikačného cyklu s cloudovou platformou. To znamená, že obsluha rádiových modulu, ktorú zabezpečuje navrhnutý firmware, zaberá iba 13 % času v rámci jedného komunikačného cyklu.

Diplomová práca taktiež popisuje proces ukladania meraných dát v cloude a implementáciu „backend“ časti aplikácie. Ďalšie rozšírenie predstavuje vlastné webové rozhranie, ktoré bolo za účelom získania nových znalostí s webovým vývojom realizované bez pomoci vizualizačných nástrojov platformy AWS. Vlastná webová aplikácia „NB-IoT dashboard“ zabezpečuje obojsmernú komunikáciu a umožňuje tak používateľovi, okrem zobrazenia real-time hodnôt, odosielať aj príkazy koncentrátora a nastavovať periódy, s akou majú jednotlivé senzory odosielať svoje dáta.

Funkčnosť celého riešenia bola úspešne otestovaná na laboratórnom fotobioreaktore v zjednodušenom prevedení. Meranie prebiehalo počas 13 dní a na základe minutého objemu dát možno predpokladať, že pri tomto prevedení by predplatné postačovalo na dobu viac ako 8 rokov.

Napriek množstvu práce vykonanej na tomto projekte ponúka diplomová práca nemalý priestor na zlepšenie. Dôležité aspekty, ktoré by bolo vhodné otestovať, pretože môžu byť relevantné pre iné aplikácie, sú energetická náročnosť NB-IoT technológie a pokrytie signálom ťažšie dostupných miest. Ďalším aspektom je spotreba dátového balíka, ktorú možno optimalizovať redukciami množstva informácií, ktoré sa odosielajú v každom JSON objekte spolu s meranými dátami na cloud. V neposlednom rade ponúka priestor na zlepšenie aj firmware. V rámci riadiaceho algoritmu by bolo vhodné pridať možnosť automatickej zmeny frekvencie merania vybraných senzorov. Perióda by sa dynamicky skrátila v prípade, že nastal v hodnote snímanej veličiny väčší skok, alebo naopak predĺžila, ak sa meraná hodnota dlhšiu dobu príliš nemení. Súčasná aplikácia však splnila stanovené ciele práce a v niektorých prípadoch ich dokonca prekročila o implementáciu vlastných rozšírení.

Výsledná práca sa snaží byť užitočným zdrojom informácií pre tých, ktorí rozmýšľajú nad využitím komunikačnej technológie NB-IoT s podobným technickým zámerom a zvažujú vhodnosť jej implementácie vo svojom riešení. Diplomová práca zahŕňa viaceré aspekty vývoja IoT aplikácie, od návrhu hardwaru, cez implementáciu riadiaceho algoritmu až po samotné vykreslenie zbieraných dát. Prakticky testuje nielen možnosti NB-IoT technológie, ale aj jej obmedzenia a poukazuje na výzvy spojené s jej adaptáciou v daných podmienkach.

9 Zoznam použitých zdrojov

- [1] DOHLER, Mischa a Takehiro NAKAMURA. 5G Mobile and Wireless Communications Technology: 4 - Machine-type communications. In: *Cambridge Core* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: www.cambridge.org/core/books/5g-mobile-and-wireless-communications-technology/1FB952899CAEFC7B05F6A334C9ECDA8
- [2] SCHLIENZ, J. a D. RADDINO. *Narrowband Internet of Things: Whitepaper* [online]. 2016, (0), 42 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0_e_NB_IoT.pdf
- [3] RATASUK, R., B. VEJLGAARD, N. MANGALVEDHE a A. GHOSH. *NB-IoT system for M2M communication* [online]. In: . Doha, Qatar: IEEE, 2016, s. 5 [cit. 2023-03-21]. ISBN 978-1-4673-9814-5. Dostupné z: doi:10.1109/WCNC.2016.7564708
- [4] BEYENE, Y. D. *NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation* [online]. In: . IEEE Wireless Communications, 2017, s. 26-32 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: doi:10.1109/MWC.2017.1600418
- [5] PURNELL, L., ed. *NB-IoT DEPLOYMENT GUIDE to Basic Feature set Requirements*. GSMA, 2018, (20), 35.
- [6] LUKMAN, NADYA. NB-IoT Networks You Can Start Using Today (Worldwide). In: *NexPCB* [online]. NexPCB, 2021 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: www.nexpcb.com/blog/nb-iot-worldwide-coverage
- [7] Downlink and uplink: definition. In: *TechTarget* [online]. Techtarger, 2007 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/downlink-and-uplink
- [8] MIGABO, Emmanuel, Karim DJOUANI a Anish KURIEN. A Modelling Approach for the Narrowband IoT (NB-IoT) Physical (PHY) Layer Performance. In: *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* [online]. Washington: IEEE, 2018, s. 5207-5214 [cit. 2023-03-21]. ISBN 978-1-5090-6684-1. ISSN 2577-1647. Dostupné z: doi:10.1109/IECON.2018.8591281
- [9] KANJ, Matthieu, Vincent SAVAUX a Mathieu LE GUEN. A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. IEEE, 2020, 22(4), 2408-2446 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: doi:10.1109/COMST.2020.3022751
- [10] 4G/LTE - Frame Structure / Downlink. In: *ShareTechnote* [online]. ShareTechnote [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.sharetechnote.com/html/FrameStructure_DL.html
- [11] Physical Resource Block. In: *ScienceDirect* [online]. ScienceDirect, 2020 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: www.sciencedirect.com/topics/computer-science/physical-resource-block
- [12] S. RAZAGHI, Y.-P., X. LIN, A. ADHIKARY, A. GROVLEN, Y. SUI, Y. BLANKENSHIP, J. BERGMAN a H. S. RAZAGHI. A Primer on 3GPP Narrowband

- Internet of Things. *IEEE Xplore* [online]. IEEE, 2017, 55(3), 117-123 [cit. 2023-03-21]. ISSN 0163-6804. Dostupné z: doi:10.1109/MCOM.2017.1600510CM
- [13] What is LPWAN? Low Power Wide Area Network Technology. In: *Pelion* [online]. Pelion [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: pelion.com/blog/education/what-is-lpwan-low-power-wide-area-network-technology/
- [14] A COMPREHENSIVE LOOK AT Low Power, Wide Area Networks: For ‘Internet of Things’ Engineers and Decision Makers. In: *Link-Labs* [online]. Link-Labs [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/hubfs/LPWAN%20Whitepaper.pdf?hsCtaTracking=c85357e5-f684-4b3a-a739-f308be38b16a%7Cf3e2ce42-d1b5-4d5b-9eb2-fab185721c7e>
- [15] Difference between Licensed LPWAN vs Unlicensed LPWAN. In: *RF Wireless World* [online]. RF Wireless World, 2012 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Licensed-LPWAN-vs-Unlicensed-LPWAN.html>
- [16] 2.4 GHz – The Ideal Unlicensed Spectrum for Long-Range IoT Networking (Part I). In: *Ingenu* [online]. Ingenu Inc., 2015 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: https://www.ingenu.com/2015/07/2-4-ghz-the-ideal-unlicensed-spectrum-for-long-range-iot-networking-part-i/?doing_wp_cron=1678995215.9002261161804199218750
- [17] SOURMEY, Isabelle. The impact of the communication technology protocol on your IoT application’s power consumption. In: *Saft* [online]. Saft, 2020 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.saft.com/energizing-iot/impact-communication-technology-protocol-your-iot-application%E2%80%99s-power-consumption>
- [18] LIBERG, Olof, Marten SUNDBERG, Y.-P. ERIC WANG, Johan BERGMAN a Joachim SACHS. *Cellular Internet of Things: Technologies, Standards, and Performance* [online]. In: . Elsevier, 2017, s. 398 [cit. 2023-03-26]. ISBN 978-0-12-812458-1. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/C2016-0-01868-5
- [19] MALIK, H., S. KHAN, J. REDONDO SARMIENTO, A. KUUSIK, M. ALAM, Y. LE MOULLEC a S. PÄRAND. *NB-IoT Network Field Trial: Indoor, Outdoor and Underground Coverage Campaign* [online]. Morocco, 2019, 537-542 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: doi:10.1109/IWCMC.2019.8766568
- [20] Leading the LTE IoT evolution to connect the massive Internet of Things. In: *Qualcomm* [online]. Qualcomm, 2018 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/powerpoint_messaging_-_leading_the_lte_iot_evolution_to_connect_the_massive_iot_july18.pdf
- [21] NB-IoT 3GPP release 14. What are the new features?. In: *Haltian* [online]. Haltian, 2019 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://haltian.com/resource/nb-iot-3gpp-release-14-what-are-the-new-features/>
- [22] BENHIBA, B., A. MADI a A. ADDAIM. Comparative Study of The Various new Cellular IoT Technologies. In: *International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)* [online]. Kenitra, Morocco: IEEE, 2018, s. 1-4 [cit. 2023-03-26]. ISBN 978-1-5386-7868-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICECOCS.2018.8610508

- [23] PEŠKA, Robert. LTE M v otázkách a odpovědích. In: *Vyvoj.hw.cz: profesionální elektronika* [online]. HW server s.r.o., 2019 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/lte-m-v-otazkach-a-odpovedich.html>
- [24] LESUND, Martin. LTE-M vs NB-IoT Field Test: How Distance Affects Power Consumption. In: *Nordic Semiconductor: DevZone* [online]. Nordic Semiconductor, 2022 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://devzone.nordicsemi.com/nordic/nordic-blog/b/blog/posts/ltem-vs-nbiot-field-test-how-distance-affects-power-consumption#mcetoc_1gbn0onnv3
- [25] GSMA: Internet Of Things. In: *GSMA* [online]. GSM Association [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-commercial-launches/>
- [26] Vodafone mapa pokryti. In: *Vodafone* [online]. Vodafone, 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/mapa-pokryti/>
- [27] Vodafone IoT Easy Connect. In: *Vodafone* [online]. Vodafone, 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/podnikatele/internet-veci/iot-easy-connect/>
- [28] Vodafone Business IoT Easy Connect. In: *Vodafone* [online]. Vodafone, 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://www.vodafone.cz/_sys_/FileStorage/download/2/1729/faq-iot-easy-connect-vfcz_72.pdf?nc=1
- [29] FOSTER, Landon D. What Is SIGFOX?. In: *CBT Nuggets* [online]. CBT Nuggets, 2022 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.cbtnuggets.com/blog/technology/networking/what-is-sigfox>
- [30] *Sigfox Technical Overview* [online]. Labrège – France: Sigfox, 2018, 26 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.avnet.com/wps/wcm/connect/onesite/03aebfe2-98f7-4c28-be5f-90638c898009/sigfox-technical-overview.pdf?MOD=AJPERES&CVID=magVa.N&CVID=magVa.N&CVID=magVa.N>
- [31] Sigfox build: Payload. In: *Sigfox build* [online]. Sigfox [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://build.sigfox.com/payload>
- [32] Sigfox support: Downlink information. In: *Sigfox support* [online]. Sigfox [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://support.sigfox.com/docs/downlink-information>
- [33] [WEBINAR] Best way to connect your Cloud to Sigfox. In: *Youtube* [online]. Sigfox 0G Technology, 2019 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yQ4IxkgHJJE&t=1554s>
- [34] Sigfox: FAQ. In: *Sigfox Česká republika* [online]. Česko: Sigfox, 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://sigfox.cz/cs/faq>
- [35] Sigfox: coverage. In: *Sigfox* [online]. Sigfox, 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/coverage/>
- [36] Sigfox Atlas. In: *Sigfox* [online]. Sigfox [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://build.sigfox.com/geolocation-sigfox-atlas>
- [37] Základní ceník konektivity. In: *Sigfox Česká republika* [online]. Sigfox [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://sigfox.cz/cs/o-nas/cenik-vop>

- [38] PECH, Jiří. IOT TECHNOLOGIE: LORA A LORAWAN. In: *Eman* [online]. Eman, 2019 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.eman.cz/blog/iot-technologie-lora-a-lorawan-3-5/>
- [39] What are LoRa and LoRaWAN?. In: *The Things Network* [online]. The Things Industries [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>
- [40] Frequency Plans by Country. In: *The Things Network* [online]. The Things Industries [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>
- [41] LoRaWAN Architecture. In: *The Things Network* [online]. The Things Industries [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- [42] What is LoRaWAN Specification. In: *LoRa Alliance* [online]. LoRa Alliance [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [43] Device Classes. In: *The Things Network* [online]. The Things Industries [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>
- [44] Jaké je pokrytí LoRaWAN v ČR. In: *IoT Port* [online]. České Radiokomunikace a.s. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/lorawan-sit-pro-iot>
- [45] Objednáváte připojení k IoT síti LoRa. In: *IoT Port* [online]. České Radiokomunikace a.s. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/objednavka-lorawan>
- [46] UG56-868M. In: *ESCAD Trade* [online]. ESCAD Trade [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.escadtrade.cz/prumyslova-lorawan-brana-ethernet-poe-wifi-externi-antena-p20705/>
- [47] Quick Start. In: *The Things Network* [online]. The Things Industries [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/quick-start/>
- [48] IoT Cloud Platforms Comparison: Kaa vs AWS vs Google Cloud. In: *Kaa IoT* [online]. Kaa IoT [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.kaaiot.com/advantages/iot-platforms-comparison>
- [49] MUTS, Ivan. 10+ Best IoT Cloud Platforms in 2023. In: *Euristiq* [online]. Ukraine, Kulparkivska St, 59: Euristiq [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://euristiq.com/best-iot-cloud-platforms/>
- [50] IoT Core. In: *Google Cloud* [online]. Alphabet, 2023 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://cloud.google.com/iot-core>
- [51] Azure IoT. In: *Microsoft Azure* [online]. Microsoft, 2023 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/iot/#iot-approach>
- [52] IBM Watson IoT Platform. In: *IBM Cloud* [online]. IBM, 2023 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://internetofthings.ibmcloud.com/>
- [53] Internet of Things (IoT). In: *Oracle* [online]. Oracle, 2023 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.oracle.com/internet-of-things/>
- [54] ThingSpeak for IoT Projects. In: *ThingSpeak* [online]. Mathworks, 2023 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://thingspeak.com/>

- [55] Making Sense of IoT Platforms: AWS vs Azure vs Google vs IBM vs Cisco. In: *Altexsoft* [online]. Altexsoft, 2020 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.altexsoft.com/blog/iot-platforms/>
- [56] VAILSHERY, Lionel Sujay. Cloud infrastructure services vendor market share worldwide from 4th quarter 2017 to 4th quarter 2022. In: *Statista* [online]. Statista, 2023 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/967365/worldwide-cloud-infrastructure-services-market-share-vendor/>
- [57] AWS IoT: Unlock your IoT data and accelerate business growth. In: *AWS Amazon* [online]. Amazon, 2023 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://aws.amazon.com/iot/>
- [58] AWS Amazon. In: *AWS Amazon* [online]. Amazon, 2023 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://aws.amazon.com/>
- [59] CRAGGS, Ian. MQTT Vs. HTTP for IoT. In: *HiveMQ* [online]. HiveMQ, 2022 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-vs-http-protocols-in-iiot/>
- [60] WANG, Charlie. HTTP vs. MQTT: A tale of two IoT protocols. In: *Google Cloud* [online]. Google, 2018 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://cloud.google.com/blog/products/iot-devices/http-vs-mqtt-a-tale-of-two-iiot-protocols>
- [61] GÖTZ, Christian. *MQTT 101 – How to Get Started with the lightweight IoT Protocol* [online]. In: . Eclipse Foundation [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: https://www.eclipse.org/community/eclipse_newsletter/2014/october/article2.php
- [62] BELL, David. Everything You Need To Know About Zigbee. In: *Vesternet* [online]. Vesternet, 2022 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.vesternet.com/en-eu/pages/what-is-zigbee>
- [63] PANNELL, Tom. How Zigbee, Thread, and Bluetooth Mesh stack up in performance benchmarking. In: *Embedded computing* [online]. Embedded computing, 2018 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://embeddedcomputing.com/technology/iiot/edge-computing/how-zigbee-thread-and-bluetooth-mesh-stack-up-in-performance-benchmarking>
- [64] Benchmarking Bluetooth Mesh, Thread, and Zigbee Network Performance. In: *Silabs* [online]. Silicon labs [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/wireless/multiprotocol/mesh-performance>
- [65] MASOJÍDEK, Jiří a Richard LHOTSKÝ. *Mikrořasy – solární továrna v jedné buňce* [online]. In: . Praha, Jinonická: Středisko společných činností AV ČR, 2016, s. 28 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.alga.cz/UserFiles/mstefanova/files/Mikro%20řasy_sol%C3%A1rn%C3%AD%20tov%C3%A1rna_v%20jedn%C3%A9%20bu%C5%88ce.pdf
- [66] VĚCHET, Stanislav a Jan PROKOPIUS. České zařízení pro zachytávání CO2 se kvalifikovalo v soutěži o milion dolarů. Peníze věnuje inovátor Musk. In: *VUT Aktuality* [online]. VUT, 2022 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vut/f19528/d225405>
- [67] AWS Free Tier. In: *AWS Amazon* [online]. Amazon, 2023 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://aws.amazon.com/free/?all-free-tier.sort->

by=item.additionalFields.SortRank&all-free-tier.sort-order=asc&awsf.Free%20Tier%20Types=*all&awsf.Free%20Tier%20Categories=*all

- [68] In: *Espressif* [online]. Shanghai: Espressif Systems, 2022 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf
- [69] ESP32-C3-DevKitC-02. In: *Mouser* [online]. Mouser Electronics, Inc., 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-C3-DevKitC-02?qs=stqOd1AaK7%2F1Q62ysr4CMA%3D%3D>
- [70] AWS Partner Device Catalog. In: *AWS Amazon* [online]. Amazon Web Services, Inc., 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://devices.amazonaws.com/search?page=1>
- [71] LPWA BG96 Cat M1/NB1/EGPRS. In: *Quectel* [online]. Shanghai: Quectel, 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.quectel.com/product/lpwa-bg96-cat-m1-nb1-egprs>
- [72] LTE IOT 2 CLICK. In: *Mikroe* [online]. MikroElektronika d.o.o., 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.mikroe.com/lte-iot-2-click>
- [73] JLCPCB. In: *JLCPCB.com* [online]. JLCPCB, 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/>
- [74] Precizní modul BME280 – měření teploty, vlhkosti a barometrického tlaku. In: *Dratek* [online]. ECLIPSERA s.r.o., 2017 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/91/1469214547.pdf>
- [75] *GL55 Series Photoresistor* [online]. In: . [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/756863/CdS/GL5528/1>
- [76] *Intelligent Infrared CO2 Module: (Model: MH-Z19B)* [online]. In: . China: Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf
- [77] *DIY MORE PH-4502C modul pro měření pH* [online]. In: . Laskakit, 2023 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/diy-more-ph-4502c-modul-pro-mereni-ph/>
- [78] *PH Sensor E-201-C* [online]. In: . e-Gizmo Mechatronix Central, 2017 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.e-gizmo.net/oc/kits%20documents/PH%20Sensor%20E-201-C/PH%20Sensor%20E-201-C.pdf>
- [79] *Čidlo zákalu vody TS-300B* [online]. In: . Laskakit, 2023 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/cidlo-zakalu-vody-ts-300b/>
- [80] *ACS712 Datasheet* [online]. In: . Allegro MicroSystems, 2021 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/168326/ALLEGRO/ACS712.html>
- [81] AFANEH, Mohammad. *Bluetooth Mesh Networking: The Ultimate Guide* [online]. In: . Novel Bits, 2022 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://novelbits.io/bluetooth-mesh-networking-the-ultimate-guide/>
- [82] LAGACÉ, Michel. A Light Activated Switch. In: *Mike's Electro Shack* [online]. 2020 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://lagacemichel.com/tag/photoresistor-2/>

10 Zoznam skratiek, obrázkov a tabuliek

10.1 Zoznam skratiek

| | |
|---------|---|
| IoT | Internet of Things |
| NB-IoT | Narrow Band - Internet of Things |
| MTC | Machine-Type Communication |
| LTE | Long Term Evolution |
| GSM | Global System for Mobile communications |
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project |
| RF | Rádiofrekvenčný |
| PRB | Physical Resource Block |
| BS | Base Station |
| OFDMA | Orthogonal Frequency-Division Multiple Access |
| RE | Resource Element |
| SC-FDMA | Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access |
| UE | User Equipment |
| eNB | evolved Node B |
| LPWAN | Low Power Wide Area Network |
| LTE-M | Long Term Evolution - for Machines |
| eDRX | extended Discontinuous Reception |
| PSM | Power-Saving Mode |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| 16QAM | 16 bit Quadrature Amplitude Modulation |
| VoLTE | Voice over LTE |
| VoIP | Voice over Internet Protocol |
| OTA | Over The Air |
| SNR | Signal to Noise Ration |
| RSSI | Received Signal Strength Indicator |
| LoRaWAN | Long Range Wide Area Network |
| SDK | Software Development Kit |
| MQTT | Message Queuing Telemetry Transport |
| QoS | Quality of Service |
| MAC | Media Access Control |
| BLE | Bluetooth Low Energy |
| MCU | Micro-Controller Unit |
| PBR | Photobioreactor |

10.2 Zoznam obrázkov

| | |
|---|----|
| Obr. 2.1) Prevádzkové režimy NB-IoT [9] | 13 |
| Obr. 2.2) Štruktúra jedného NB-IoT frame [10]..... | 14 |
| Obr. 2.3) Physical Resource Block [11] | 14 |
| Obr. 2.4) NB-IoT downlink frame pre jednotlivé režimy nasadenia [9, s. 7]..... | 16 |
| Obr. 2.5) Porovnanie bezdrôtových komunikačných technológií [17]..... | 19 |
| Obr. 2.6) Spotreba energie s využitím mechanizmov PSM a eDRX v NB-IoT [20] | 21 |
| Obr. 2.7) Pokrytie Vodafone NB-IoT siete v ČR [26]..... | 24 |
| Obr. 2.8) Odolnosť voči šumu [30, s. 16] | 26 |
| Obr. 2.9) „Padding“ prázdnych bajtov v Sigfox protokole [31] | 26 |
| Obr. 2.10) Sigfox technológia založená na UNB [30, s. 8] | 27 |
| Obr. 2.11) Pokrytie Sigfox siete v ČR [35] | 28 |
| Obr. 2.12) Architektúra LoRaWAN siete [42] | 30 |
| Obr. 2.13) Uplink / downlink LoRaWAN zariadení triedy A [43]..... | 31 |
| Obr. 2.14) Uplink / downlink LoRaWAN zariadení triedy B [43]..... | 31 |
| Obr. 2.15) Uplink / downlink LoRaWAN zariadení triedy C [43]..... | 31 |
| Obr. 2.16) Pokrytie LoRaWAN siete v ČR [44]..... | 32 |
| Obr. 2.17) Architektúra IoT systému [49] | 36 |
| Obr. 2.18) Priemerný počet odoslaných bajtov na 1 správu [60] | 41 |
| Obr. 2.19) Pub/Sub architektúra MQTT protokolu [61]..... | 41 |
| Obr. 2.20) Hviezdicová topológia a mesh topológia siete (s pripojením na cloud z 1 uzla) ... | 43 |
| Obr. 2.21) Throughput v závislosti od počtu preposlaní (payload 100 bajtov) [64] | 45 |
| Obr. 2.22) Latencia v závislosti od veľkosti payload (4 preposlania) [64] | 46 |
| Obr. 3.1) Koncept spracovania úlohy | 48 |
| Obr. 4.1) Trubkový fotobioreaktor Simbios [66]..... | 49 |
| Obr. 4.2) Schéma fotobioreaktora..... | 50 |
| Obr. 4.3) Architektúra systému pre aplikáciu NB-IoT | 52 |
| Obr. 5.1) Vývojová doska ESP32-C3-DevKitC-02 [69] | 53 |
| Obr. 5.2) LTE IoT 2 click [72] | 54 |
| Obr. 5.3) Fyzická vrstva komunikačných rozhraní NB-IoT koncentrátora | 55 |
| Obr. 5.4) Schéma zapojenia modulu ESP32-C3-WROOM-02 | 56 |
| Obr. 5.5) Schéma zapojenia LDO regulátora..... | 56 |
| Obr. 5.6) Schéma zapojenia USB konektora na pripojenie k USB rozhraniu mikrokontroléra | 57 |
| Obr. 5.7) Schéma zapojenia USB konektora na pripojenie k USB/UART prevodníku | 57 |
| Obr. 5.8) Schéma zapojenia USB/UART prevodníku CP2102 | 58 |
| Obr. 5.9) Schéma zapojenia tlačidiel RESET a BOOT | 58 |
| Obr. 5.10) Schéma obvodu na automatický prechod do „boot“ módu pri programovaní | 59 |
| Obr. 5.11) Pripojenie LTE IoT 2 click na DPS NB-IoT koncentrátora..... | 59 |
| Obr. 5.12) Layout vrchnej (TOP) a spodnej (BOT) vrstvy navrhutej DPS | 60 |
| Obr. 5.13) Osadená DPS NB-IoT koncentrátora s komunikačným modulom LTE IoT 2 click | 60 |
| Obr. 5.14) Zapojenie riadiacej dosky a senzora BME280 | 61 |
| Obr. 5.15) Schéma zapojenia fotorezistora GL5528 | 62 |
| Obr. 5.16) Zapojenie riadiacej dosky a senzora MH-Z19B..... | 63 |
| Obr. 5.17) Schéma zapojenia modulu ACS712..... | 64 |

| | |
|--|----|
| Obr. 6.1) Architektúra navrhnutého FW NB-IoT koncentrátora | 66 |
| Obr. 6.2) Architektúra navrhnutého FW senzorických uzlov | 69 |
| Obr. 6.3) Príklad komunikačného cyklu | 70 |
| Obr. 6.4) Kalibrácia pH senzora | 71 |
| Obr. 7.1) 1 komunikačný cyklus medzi kontrolérom a RF modulom pri meraní data rate | 73 |
| Obr. 7.2) Experimentálne meranie data rate NB-IoT | 74 |
| Obr. 7.3) Experimentálne meranie data rate EDGE | 75 |
| Obr. 7.4) AWS – backend navrhutej aplikácie | 80 |
| Obr. 7.5) Webové rozhranie v „Live Data“ móde | 81 |
| Obr. 7.6) Demonštrácia navrhnutého riešenia na laboratórnom PBR | 82 |
| Obr. 7.7) Namerané hodnoty na PBR počas 13 dní zobrazené vo webovom rozhraní..... | 83 |

10.3 Zoznam tabuliek

| | |
|---|----|
| Tab. 2.1) Zoznam frekvenčných pásiem NB-IoT [2] | 12 |
| Tab. 2.2) Porovnanie parametrov NB-IoT a LTE-M [18] [24]..... | 23 |
| Tab. 2.3) Parametre a druhy dodávaných SIM kariet [27] | 25 |
| Tab. 2.4) Parametre siete Sigfox [30] [31] | 27 |
| Tab. 2.5) Cenník predplatného Sigfox (apríl 2023) [37] | 29 |
| Tab. 2.6) Parametre siete LoRaWAN [40] | 32 |
| Tab. 2.7) Cenník predplatného CRA (apríl 2023) [45]..... | 33 |
| Tab. 2.8) Porovnanie vybraných LPWA sietí [18] [24] [30] [40] [47]..... | 34 |
| Tab. 2.9) Cloudové IoT platformy [49], [48], [50], [51], [52], [53], [54], [55]..... | 37 |
| Tab. 2.10) Priemerný čas odpovede na 1 správu [59]..... | 40 |
| Tab. 4.1) AWS Free Tier limity [67] | 51 |
| Tab. 5.1) Parametre modulu ESP32-C3-WROOM-02 | 53 |
| Tab. 5.2) Parametre modulu Quectel BG96 LTE | 54 |
| Tab. 5.3) Parametre senzora BME280 [74] | 61 |
| Tab. 5.4) Parametre fotorezistora GL5528 [75]..... | 61 |
| Tab. 5.5) Parametre modulu MH-Z19B [76] | 62 |
| Tab. 5.6) Parametre modulu PH-4502C [77]..... | 63 |
| Tab. 5.7) Parametre sondy DIY MORE E201 [78] | 63 |
| Tab. 5.8) Parametre modulu TS-300B [79] | 64 |
| Tab. 5.9) Parametre modulu ACS712 [80] | 64 |
| Tab. 6.1) Typy AT príkazu | 67 |
| Tab. 7.1) Spotreba dát pri otvorení a zatvorení „session“ kontextu | 77 |
| Tab. 7.2) NB-IoT – Overhead pri prenose 1MB dát v 256 správach s payload 4 kB..... | 78 |
| Tab. 7.3) NB-IoT – Overhead pri prenose 1MB dát v 1024 správach s payload 1 kB..... | 78 |
| Tab. 11.1) NB-IoT – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 15 (-83 dBm)..... | 96 |
| Tab. 11.2) EDGE – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 26 (-61 dBm)..... | 97 |
| Tab. 11.3) EDGE – Overhead pri prenose 1MB dát v 256 správach s payload 4 kB..... | 98 |
| Tab. 11.4) EDGE – Overhead pri prenose 1MB dát v 1024 správach s payload 1 kB..... | 98 |

11 Zoznam príloh

11.1 Prílohy v práci

Tab. 11.1) NB-IoT – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 15 (-83 dBm)

Tab. 11.2) EDGE – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 26 (-61 dBm)

Tab. 11.3) EDGE – Overhead pri prenose 1MB dát v 256 správach s payload 4 kB

Tab. 11.4) EDGE – Overhead pri prenose 1MB dát v 1024 správach s payload 1 kB

11.2 Externé prílohy

K práci je priložená zložka, ktorá obsahuje projekt dosky plošných spojov pre NB-IoT koncentrátor, csv súbory s hodnotami z merania na fotobioreaktore a zdrojové kódy, ktoré boli navrhnuté v rámci praktickej časti diplomovej práce.

Zložky v prílohe

2023_Appendix_Cagan_Juraj_200349

| | |
|-------------------------|--|
| — AWS | — <u>AWS backend</u> |
| — Lambda_Functions | — Lambda funkcie |
| — Rules | — SQL pravidlá v AWS IoT Core |
| — Firmware | — <u>Hlavná časť diplomovej práce</u> |
| — Concentrator_FW | — FW NB-IoT koncentrátor |
| — include | — Hlavičkové súbory |
| — src | — Zdrojové súbory |
| — Sensor_Nodes_FW | — FW senzorických uzlov |
| — common | — Spoločné BLE mesh modely |
| — connection_schemes | — Obrázky zapojenia senzorov |
| — sensor_node_BME280 | — FW senzora teploty, tlaku a vlhkosti |
| — sensor_node_co2 | — FW senzora koncentrácie CO ₂ |
| — sensor_node_current | — FW senzora elektrického prúdu |
| — sensor_node_ph | — FW senzora pH média |
| — sensor_node_photores | — FW senzora intenzity osvetlenia |
| — sensor_node_turbidity | — FW senzora zákalu |
| — Measurement | — <u>CSV súbory z merania na PBR</u> |
| — 2023 | — Rok |
| — 05 | — Mesiac |
| — 04 | — Dni |
| — 05 | |
| — ... | |
| — 16 | |
| — NB-IoT_PCB_rev_1_1 | — <u>KiCad projekt NB-IoT koncentrátor</u> |
| — Web_Application | — <u>Používateľské rozhranie</u> |

Zložka "Firmware" neobsahuje konfiguračné súbory CMakeLists.txt, závislosti frameworku PlatformIO a knižnice ESP-IDF. Bez nich však nie je možné projekt skompilovať. Počas vývoja NB-IoT aplikácie bol použitý verzovací systém Git a všetky projekty, vrátane potrebných závislostí, sú dostupné v [GitHub repozitári](#).

Prílohy

Tab. 11.1) NB-IoT – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 15 (-83 dBm)

| i | Air-time [ms] | | | Data rate [kB/s] | | | i | Air-time [ms] | | | Data rate [kB/s] | | |
|---------------------|---------------|------|------|------------------|------|------|------------|---------------|-------------|-------------|------------------|-------------|------|
| | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB | | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB |
| 1 | 805 | 832 | 2377 | 0,62 | 1,20 | 1,68 | 51 | 519 | 1054 | 3681 | 0,96 | 0,95 | 1,09 |
| 2 | 966 | 734 | 1293 | 0,52 | 1,36 | 3,09 | 52 | 682 | 706 | 3713 | 0,73 | 1,42 | 1,08 |
| 3 | 680 | 1439 | 5337 | 0,74 | 0,69 | 0,75 | 53 | 453 | 1036 | 1916 | 1,10 | 0,97 | 2,09 |
| 4 | 839 | 733 | 2936 | 0,60 | 1,36 | 1,36 | 54 | 792 | 1039 | 4583 | 0,63 | 0,96 | 0,87 |
| 5 | 744 | 1150 | 4235 | 0,67 | 0,87 | 0,94 | 55 | 920 | 831 | 3833 | 0,54 | 1,20 | 1,04 |
| 6 | 519 | 1247 | 2662 | 0,96 | 0,80 | 1,50 | 56 | 607 | 725 | 2826 | 0,82 | 1,38 | 1,42 |
| 7 | 742 | 953 | 3449 | 0,67 | 1,05 | 1,16 | 57 | 722 | 745 | 4168 | 0,69 | 1,34 | 0,96 |
| 8 | 1338 | 819 | 4726 | 0,37 | 1,22 | 0,85 | 58 | 1032 | 431 | 4107 | 0,48 | 2,32 | 0,97 |
| 9 | 1220 | 602 | 3802 | 0,41 | 1,66 | 1,05 | 59 | 760 | 655 | 3527 | 0,66 | 1,53 | 1,13 |
| 10 | 696 | 1363 | 3785 | 0,72 | 0,73 | 1,06 | 60 | 744 | 1413 | 2074 | 0,67 | 0,71 | 1,93 |
| 11 | 735 | 976 | 2842 | 0,68 | 1,02 | 1,41 | 61 | 919 | 743 | 3274 | 0,54 | 1,35 | 1,22 |
| 12 | 745 | 1405 | 3068 | 0,67 | 0,71 | 1,30 | 62 | 489 | 942 | 4297 | 1,02 | 1,06 | 0,93 |
| 13 | 557 | 371 | 3592 | 0,90 | 2,70 | 1,11 | 63 | 631 | 1134 | 3241 | 0,79 | 0,88 | 1,23 |
| 14 | 845 | 587 | 4916 | 0,59 | 1,70 | 0,81 | 64 | 936 | 1023 | 4697 | 0,53 | 0,98 | 0,85 |
| 15 | 1406 | 1331 | 3529 | 0,36 | 0,75 | 1,13 | 65 | 995 | 1192 | 1866 | 0,50 | 0,84 | 2,14 |
| 16 | 1095 | 716 | 3786 | 0,46 | 1,40 | 1,06 | 66 | 840 | 1028 | 3368 | 0,60 | 0,97 | 1,19 |
| 17 | 1286 | 455 | 1464 | 0,39 | 2,20 | 2,73 | 67 | 478 | 1245 | 3962 | 1,05 | 0,80 | 1,01 |
| 18 | 489 | 1189 | 4745 | 1,02 | 0,84 | 0,84 | 68 | 551 | 1027 | 4666 | 0,91 | 0,97 | 0,86 |
| 19 | 846 | 1246 | 3417 | 0,59 | 0,80 | 1,17 | 69 | 779 | 1195 | 3368 | 0,64 | 0,84 | 1,19 |
| 20 | 1437 | 672 | 4009 | 0,35 | 1,49 | 1,00 | 70 | 1044 | 1085 | 3193 | 0,48 | 0,92 | 1,25 |
| 21 | 554 | 435 | 3249 | 0,90 | 2,30 | 1,23 | 71 | 619 | 975 | 3737 | 0,81 | 1,03 | 1,07 |
| 22 | 776 | 442 | 4497 | 0,64 | 2,26 | 0,89 | 72 | 1059 | 1166 | 4682 | 0,47 | 0,86 | 0,85 |
| 23 | 1797 | 494 | 1753 | 0,28 | 2,02 | 2,28 | 73 | 567 | 769 | 3320 | 0,88 | 1,30 | 1,20 |
| 24 | 933 | 591 | 3833 | 0,54 | 1,69 | 1,04 | 74 | 938 | 892 | 3378 | 0,53 | 1,12 | 1,18 |
| 25 | 1000 | 1183 | 3450 | 0,50 | 0,85 | 1,16 | 75 | 772 | 543 | 2945 | 0,65 | 1,84 | 1,36 |
| 26 | 1176 | 1006 | 3257 | 0,43 | 0,99 | 1,23 | 76 | 1106 | 1040 | 4056 | 0,45 | 0,96 | 0,99 |
| 27 | 504 | 1007 | 3528 | 0,99 | 0,99 | 1,13 | 77 | 1313 | 1168 | 3545 | 0,38 | 0,86 | 1,13 |
| 28 | 662 | 862 | 2921 | 0,76 | 1,16 | 1,37 | 78 | 804 | 1052 | 4361 | 0,62 | 0,95 | 0,92 |
| 29 | 1366 | 447 | 3754 | 0,37 | 2,24 | 1,07 | 79 | 711 | 1007 | 3626 | 0,70 | 0,99 | 1,10 |
| 30 | 1153 | 591 | 3801 | 0,43 | 1,69 | 1,05 | 80 | 1210 | 1151 | 2928 | 0,41 | 0,87 | 1,37 |
| 31 | 784 | 1059 | 3017 | 0,64 | 0,94 | 1,33 | 81 | 796 | 910 | 3474 | 0,63 | 1,10 | 1,15 |
| 32 | 456 | 1017 | 5082 | 1,10 | 0,98 | 0,79 | 82 | 765 | 479 | 4648 | 0,65 | 2,09 | 0,86 |
| 33 | 713 | 958 | 3312 | 0,70 | 1,04 | 1,21 | 83 | 710 | 367 | 3897 | 0,70 | 2,72 | 1,03 |
| 34 | 581 | 514 | 3897 | 0,86 | 1,95 | 1,03 | 84 | 1129 | 431 | 2954 | 0,44 | 2,32 | 1,35 |
| 35 | 1192 | 1117 | 2610 | 0,42 | 0,90 | 1,53 | 85 | 869 | 767 | 4193 | 0,58 | 1,30 | 0,95 |
| 36 | 715 | 939 | 4505 | 0,70 | 1,06 | 0,89 | 86 | 646 | 1044 | 4098 | 0,77 | 0,96 | 0,98 |
| 37 | 678 | 431 | 3546 | 0,74 | 2,32 | 1,13 | 87 | 641 | 858 | 2250 | 0,78 | 1,17 | 1,78 |
| 38 | 369 | 655 | 3896 | 1,36 | 1,53 | 1,03 | 88 | 878 | 1166 | 1448 | 0,57 | 0,86 | 2,76 |
| 39 | 760 | 1005 | 3209 | 0,66 | 1,00 | 1,25 | 89 | 603 | 1087 | 3144 | 0,83 | 0,92 | 1,27 |
| 40 | 1292 | 992 | 3593 | 0,39 | 1,01 | 1,11 | 90 | 500 | 1341 | 5337 | 1,00 | 0,75 | 0,75 |
| 41 | 787 | 1262 | 4521 | 0,64 | 0,79 | 0,88 | 91 | 664 | 1070 | 3336 | 0,75 | 0,93 | 1,20 |
| 42 | 567 | 969 | 3593 | 0,88 | 1,03 | 1,11 | 92 | 1195 | 751 | 2705 | 0,42 | 1,33 | 1,48 |
| 43 | 680 | 889 | 3418 | 0,74 | 1,12 | 1,17 | 93 | 1189 | 959 | 3763 | 0,42 | 1,04 | 1,06 |
| 44 | 1289 | 937 | 3497 | 0,39 | 1,07 | 1,14 | 94 | 889 | 605 | 3687 | 0,56 | 1,65 | 1,08 |
| 45 | 950 | 826 | 4570 | 0,53 | 1,21 | 0,88 | 95 | 935 | 1248 | 4641 | 0,53 | 0,80 | 0,86 |
| 46 | 984 | 858 | 3352 | 0,51 | 1,17 | 1,19 | 96 | 1012 | 1421 | 3362 | 0,49 | 0,70 | 1,19 |
| 47 | 1004 | 391 | 2282 | 0,50 | 2,56 | 1,75 | 97 | 987 | 1215 | 3400 | 0,51 | 0,82 | 1,18 |
| 48 | 772 | 575 | 3272 | 0,65 | 1,74 | 1,22 | 98 | 664 | 945 | 3209 | 0,75 | 1,06 | 1,25 |
| 49 | 683 | 1231 | 2874 | 0,73 | 0,81 | 1,39 | 99 | 792 | 940 | 3145 | 0,63 | 1,06 | 1,27 |
| 50 | 1384 | 847 | 3977 | 0,36 | 1,18 | 1,01 | 100 | 363 | 831 | 3880 | 1,38 | 1,20 | 1,03 |
| Priemer | | | | | | | 845 | 908 | 3535 | 0,65 | 1,24 | 1,22 | |
| Smerodajná odchýlka | | | | | | | 273 | 278 | 821 | 0,21 | 0,49 | 0,41 | |

Tab. 11.2) EDGE – Meranie doby prenosu (air-time) a data rate pre payloady veľkosti 512 B, 1024 B a 4096 B pri RSSI 26 (-61 dBm)

| i | Air-time [ms] | | | Data rate [kB/s] | | | i | Air-time [ms] | | | Data rate [kB/s] | | |
|---------------------|---------------|------|------|------------------|-------|-------|------------|---------------|------------|-------------|------------------|--------------|-------|
| | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB | | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB | 0,5 kB | 1 kB | 4 kB |
| 1 | 262 | 370 | 754 | 1,91 | 2,70 | 5,31 | 51 | 159 | 233 | 235 | 3,14 | 4,29 | 17,02 |
| 2 | 518 | 390 | 138 | 0,97 | 2,56 | 28,99 | 52 | 217 | 449 | 258 | 2,30 | 2,23 | 15,50 |
| 3 | 160 | 391 | 157 | 3,13 | 2,56 | 25,48 | 53 | 143 | 609 | 158 | 3,50 | 1,64 | 25,32 |
| 4 | 159 | 150 | 637 | 3,14 | 6,67 | 6,28 | 54 | 360 | 293 | 314 | 1,39 | 3,41 | 12,74 |
| 5 | 555 | 72 | 374 | 0,90 | 13,89 | 10,70 | 55 | 120 | 187 | 137 | 4,17 | 5,35 | 29,20 |
| 6 | 136 | 307 | 138 | 3,68 | 3,26 | 28,99 | 56 | 238 | 431 | 336 | 2,10 | 2,32 | 11,90 |
| 7 | 299 | 113 | 138 | 1,67 | 8,85 | 28,99 | 57 | 215 | 450 | 258 | 2,33 | 2,22 | 15,50 |
| 8 | 161 | 306 | 277 | 3,11 | 3,27 | 14,44 | 58 | 142 | 191 | 116 | 3,52 | 5,24 | 34,48 |
| 9 | 136 | 114 | 355 | 3,68 | 8,77 | 11,27 | 59 | 540 | 288 | 335 | 0,93 | 3,47 | 11,94 |
| 10 | 143 | 228 | 198 | 3,50 | 4,39 | 20,20 | 60 | 1139 | 191 | 157 | 0,44 | 5,24 | 25,48 |
| 11 | 318 | 168 | 217 | 1,57 | 5,95 | 18,43 | 61 | 435 | 330 | 378 | 1,15 | 3,03 | 10,58 |
| 12 | 118 | 251 | 314 | 4,24 | 3,98 | 12,74 | 62 | 220 | 408 | 157 | 2,27 | 2,45 | 25,48 |
| 13 | 136 | 131 | 198 | 3,68 | 7,63 | 20,20 | 63 | 358 | 2619 | 158 | 1,40 | 0,38 | 25,32 |
| 14 | 383 | 108 | 475 | 1,31 | 9,26 | 8,42 | 64 | 3200 | 3013 | 157 | 0,16 | 0,33 | 25,48 |
| 15 | 157 | 552 | 738 | 3,18 | 1,81 | 5,42 | 65 | 580 | 1619 | 217 | 0,86 | 0,62 | 18,43 |
| 16 | 263 | 349 | 1298 | 1,90 | 2,87 | 3,08 | 66 | 394 | 469 | 218 | 1,27 | 2,13 | 18,35 |
| 17 | 240 | 191 | 2178 | 2,08 | 5,24 | 1,84 | 67 | 622 | 173 | 157 | 0,80 | 5,78 | 25,48 |
| 18 | 300 | 408 | 677 | 1,67 | 2,45 | 5,91 | 68 | 397 | 151 | 296 | 1,26 | 6,62 | 13,51 |
| 19 | 198 | 89 | 854 | 2,53 | 11,24 | 4,68 | 69 | 281 | 210 | 216 | 1,78 | 4,76 | 18,52 |
| 20 | 196 | 149 | 1297 | 2,55 | 6,71 | 3,08 | 70 | 496 | 307 | 139 | 1,01 | 3,26 | 28,78 |
| 21 | 300 | 191 | 517 | 1,67 | 5,24 | 7,74 | 71 | 161 | 270 | 314 | 3,11 | 3,70 | 12,74 |
| 22 | 143 | 186 | 715 | 3,50 | 5,38 | 5,59 | 72 | 159 | 654 | 319 | 3,14 | 1,53 | 12,54 |
| 23 | 181 | 131 | 577 | 2,76 | 7,63 | 6,93 | 73 | 138 | 288 | 276 | 3,62 | 3,47 | 14,49 |
| 24 | 480 | 90 | 558 | 1,04 | 11,11 | 7,17 | 74 | 419 | 192 | 997 | 1,19 | 5,21 | 4,01 |
| 25 | 139 | 89 | 415 | 3,60 | 11,24 | 9,64 | 75 | 117 | 187 | 978 | 4,27 | 5,35 | 4,09 |
| 26 | 279 | 90 | 138 | 1,79 | 11,11 | 28,99 | 76 | 136 | 390 | 1117 | 3,68 | 2,56 | 3,58 |
| 27 | 156 | 90 | 235 | 3,21 | 11,11 | 17,02 | 77 | 240 | 209 | 434 | 2,08 | 4,78 | 9,22 |
| 28 | 203 | 91 | 240 | 2,46 | 10,99 | 16,67 | 78 | 120 | 353 | 257 | 4,17 | 2,83 | 15,56 |
| 29 | 437 | 191 | 295 | 1,14 | 5,24 | 13,56 | 79 | 180 | 228 | 378 | 2,78 | 4,39 | 10,58 |
| 30 | 400 | 90 | 415 | 1,25 | 11,11 | 9,64 | 80 | 281 | 371 | 373 | 1,78 | 2,70 | 10,72 |
| 31 | 156 | 90 | 719 | 3,21 | 11,11 | 5,56 | 81 | 118 | 210 | 119 | 4,24 | 4,76 | 33,61 |
| 32 | 180 | 127 | 475 | 2,78 | 7,87 | 8,42 | 82 | 279 | 390 | 276 | 1,79 | 2,56 | 14,49 |
| 33 | 241 | 209 | 234 | 2,07 | 4,78 | 17,09 | 83 | 137 | 367 | 133 | 3,65 | 2,72 | 30,08 |
| 34 | 143 | 90 | 558 | 3,50 | 11,11 | 7,17 | 84 | 196 | 209 | 138 | 2,55 | 4,78 | 28,99 |
| 35 | 300 | 293 | 175 | 1,67 | 3,41 | 22,86 | 85 | 161 | 269 | 415 | 3,11 | 3,72 | 9,64 |
| 36 | 138 | 90 | 780 | 3,62 | 11,11 | 5,13 | 86 | 118 | 371 | 678 | 4,24 | 2,70 | 5,90 |
| 37 | 136 | 348 | 157 | 3,68 | 2,87 | 25,48 | 87 | 137 | 191 | 535 | 3,65 | 5,24 | 7,48 |
| 38 | 299 | 89 | 236 | 1,67 | 11,24 | 16,95 | 88 | 143 | 187 | 421 | 3,50 | 5,35 | 9,50 |
| 39 | 360 | 311 | 295 | 1,39 | 3,22 | 13,56 | 89 | 258 | 413 | 216 | 1,94 | 2,42 | 18,52 |
| 40 | 142 | 90 | 278 | 3,52 | 11,11 | 14,39 | 90 | 136 | 408 | 338 | 3,68 | 2,45 | 11,83 |
| 41 | 318 | 90 | 157 | 1,57 | 11,11 | 25,48 | 91 | 142 | 191 | 176 | 3,52 | 5,24 | 22,73 |
| 42 | 137 | 168 | 138 | 3,65 | 5,95 | 28,99 | 92 | 257 | 246 | 318 | 1,95 | 4,07 | 12,58 |
| 43 | 142 | 89 | 138 | 3,52 | 11,24 | 28,99 | 93 | 316 | 311 | 135 | 1,58 | 3,22 | 29,63 |
| 44 | 138 | 108 | 1538 | 3,62 | 9,26 | 2,60 | 94 | 161 | 251 | 138 | 3,11 | 3,98 | 28,99 |
| 45 | 118 | 191 | 2777 | 4,24 | 5,24 | 1,44 | 95 | 136 | 187 | 955 | 3,68 | 5,35 | 4,19 |
| 46 | 136 | 191 | 434 | 3,68 | 5,24 | 9,22 | 96 | 263 | 191 | 876 | 1,90 | 5,24 | 4,57 |
| 47 | 262 | 247 | 1040 | 1,91 | 4,05 | 3,85 | 97 | 119 | 191 | 1169 | 4,20 | 5,24 | 3,42 |
| 48 | 198 | 89 | 1674 | 2,53 | 11,24 | 2,39 | 98 | 180 | 210 | 756 | 2,78 | 4,76 | 5,29 |
| 49 | 256 | 695 | 415 | 1,95 | 1,44 | 9,64 | 99 | 118 | 228 | 715 | 4,24 | 4,39 | 5,59 |
| 50 | 221 | 1085 | 300 | 2,26 | 0,92 | 13,33 | 100 | 136 | 288 | 517 | 3,68 | 3,47 | 7,74 |
| Priemer | | | | | | | 273 | 318 | 469 | 2,57 | 5,31 | 14,51 | |
| Smerodajná odchýlka | | | | | | | 332 | 415 | 440 | 1,08 | 3,20 | 8,96 | |

Tab. 11.3) EDGE – Overhead pri prenose 1MB dát v 256 správach s payload 4 kB

| Meranie | Celkový objem dát v 1 „session“ s_F [kB] | Čas prenosu t [s] | Celkový overhead [kB] | Overhead 1 správy msg_{OH} [kB] | Throughput th [kB/s] |
|------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|---|---------------------------|
| 1 | 1179,24 | 307,53 | 150,73 | 0,55 | 3,80 |
| 2 | 1182,84 | 277,43 | 154,34 | 0,56 | 4,23 |
| 3 | 1223,88 | 327,38 | 195,38 | 0,72 | 3,71 |
| 4 | 1217,81 | 318,89 | 189,31 | 0,70 | 3,79 |
| 5 | 1230,38 | 315,23 | 201,87 | 0,75 | 3,87 |
| Priemer | 1206,83 | 309,29 | 178,32 | 0,66 | 3,88 |
| Smerodajná odchýlka | 21,46 | 17,16 | 21,46 | 0,08 | 0,18 |

Tab. 11.4) EDGE – Overhead pri prenose 1MB dát v 1024 správach s payload 1 kB

| Meranie | Celkový objem dát v 1 „session“ s_F [kB] | Čas prenosu t [s] | Celkový overhead [kB] | Overhead 1 správy msg_{OH} [kB] | Throughput th [kB/s] |
|------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|---|---------------------------|
| 1 | 1279,00 | 438,25 | 236,98 | 0,22 | 2,90 |
| 2 | 1273,02 | 397,08 | 231,00 | 0,22 | 3,18 |
| 3 | 1281,00 | 469,77 | 238,97 | 0,22 | 2,71 |
| 4 | 1292,58 | 397,90 | 250,56 | 0,23 | 3,22 |
| 5 | 1264,57 | 409,34 | 222,54 | 0,21 | 3,06 |
| Priemer | 1278,03 | 422,47 | 236,01 | 0,22 | 3,01 |
| Smerodajná odchýlka | 9,25 | 27,95 | 9,25 | 0,01 | 0,19 |