

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Bezdrátový systém s nízkou spotřebou pro monitorování v budovách

Radim Laga

Školitel: doc. Ing. Radislav Šmíd, PhD.
Obor: Inteligentní budovy
Květen 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Laga** Jméno: **Radim** Osobní číslo: **383367**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bezdrátový systém s nízkou spotřebou pro monitorování v budovách

Název diplomové práce anglicky:

Low-power wireless system for building monitoring

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte systém pro monitorování vybraných fyzikálních veličin (např. teplota, vlhkost, hluk, vibrace apod.) v budovách, které ovlivňují vnitřní prostředí. Systém koncipujte jako hierarchický. Pro připojení měřících modulů k nadřazenému modulu použijte rozhraní Bluetooth LE a pro připojení nadřazeného modulu k vyhodnocovacímu PC použijte rozhraní WiFi. Měřicí moduly budou napájeny z baterie, proto minimalizujte odběr pro dosažení dlouhé doby provozu. Vyhodnoťte vlastnosti realizovaného systému. Z poznatků získaných při vývoji odvodte a popište řešení, zapojení a konstrukci univerzálních modulů umožňující implementaci podobných zařízení pro jiné aplikace.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ganssle, J. The Art of Designing Embedded Systems, Elsevier Science, 2008.
- [2] The Definitive Guide to ARM? Cortex?-M0 and Cortex-M0+ Processors
- [3] STMicroelectronics: DS10690 ? STM32L071 Data sheet, <http://www.st.com>
- [4] RM0377 ? STM32L0x1 Reference manual

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D., katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2018/2019

doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

28-03-2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radislavu Šmídovi, PhD. za skvělou podporu, vedení a odborné rady, které přispěly k vytvoření této práce.

Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc., který mi osvětlil nejenom současnou, ale také „historickou“ mikroprocesorovou techniku a přivedl k tajům měření elektrických veličin a metrologii.

Nakonec bych chtěl poděkovat všem svým blízkým za podporu a to nejenom během studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 25. května 2018

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje vytvoření systému IoT senzorové sítě s nízkou spotřebou koncových bodů, která monitoruje environmentální veličiny v daném objektu a tato data následně odesílá na webový server GroveStreams pomocí Wi-fi k pozdějšímu zpracování. Cílem této práce je navrhnout a realizovat nákladově levnou senzorovou síť, jejíž účelem je monitorování environmentálních veličin v inteligentních budovách, případně i v jiných objektech a prostředí (záleží na umístění senzorových modulů).

Prvotní experimenty systému byly realizovány pomocí vývojového kitu Nucleo-L053R8 a BLE X-Nucleo-IDB05A1 rozšiřující desky od firmy STMicroelectronics. Po praktickém ověření koncepce nízkoenergetické komunikace byly navrženy finální PCB senzorového a centrálního modulu. Návrh PCB byl na několik iterací z důvodu ladění (přízpůsobení) VF části na bluetooth pracovní frekvenci vzhledem k variabilitě permitivity použitého laminátu (standardní FR-4). Centrální jednotka obsahuje pro přístup na Wi-fi a odeslání dat ze senzorových koncových bodů modul ESP8266MOD, který je prakticky nejlevnější variantou Wi-fi modulu na trhu. Senzorový modul, stejně jako centrální modul, umožňuje přístup k měřeným datům přes sériový port (pravidelný textový výstup).

Klíčová slova: IoT, monitorování environmentálních veličin, STMicroelectronics, Bluetooth, BlueNRG, Wi-fi, vestavné systémy, ESP8266, STM32L0, ThingSpeak, GroveStreams

Školitel: doc. Ing. Radislav Šmíd, PhD.

Abstract

The presented diploma thesis is dedicated to a creation of IoT sensor network with low energy consumption of the end nodes, which monitors environmental variables in the building and sends these measured data via Wi-fi to a web server GroveStreams for later processing. The aim of this thesis is to design and realize cheap sensor network, which purpose is monitoring the environmental variables in smart buildings or in another objects and environments (depends on the location of the sensor modules).

The first experiments of this system were realized with the Nucleo-L053R8 development kit and the BLE extending board X-Nucleo-IDB05A1 from the company STMicroelectronics. After the practical low energy communication concept verification the final PCB sensor and central module were designed. The PCB design took few iterations to get the positive results due to tuning RF part for bluetooth working frequency because of the permittivity variability used epoxy laminate (standard FR-4). The central unit contains one of the cheapest Wi-fi modules on the market, the ESP8266MOD for the Wi-fi network connection and uploading the measured data from the sensor modules to a web server. The sensor module as the central module, both provide access to measured data via serial port interface (periodical text output).

Keywords: IoT, environmental variables monitoring, STMicroelectronics, Bluetooth, BlueNRG, Wi-fi, embedded systems, ESP8266, STM32L0, ThingSpeak, GroveStreams

Title translation: Low-power wireless system for building monitoring

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Architektura IoT	2
1.2 Současný stav	2
1.3 Cíle této práce	6
2 Koncepce systému	7
2.1 Struktura senzorové sítě	7
2.1.1 Centrální jednotka	8
2.1.2 Senzorový modul	9
2.2 IoT cloudové platformy	10
2.2.1 Otevřené IoT platformy	10
2.2.2 Proprietární IoT platformy	10
3 Vlastní realizace HW	11
3.1 Experimenty s Nucleo STM32L053 kitem a BLE komunikace	11
3.1.1 Měření dosahu BlueNRG	12
3.2 Senzorový modul	13
3.2.1 MCU část	16
3.2.2 BlueNRG část	17
3.2.3 Senzorová část	20
3.2.4 Odhad životnosti baterie	22
3.2.5 Návrh PCB	23
3.3 Centrální jednotka	24
3.3.1 MCU a Wi-fi část	26
3.3.2 Obvody napájení	27
3.3.3 Návrh PCB	29
3.4 Návrh PCB antény	30
4 SW řešení	35
4.1 Senzorový modul	36
4.2 Centrální modul	38
5 Výsledky	41
5.1 Realizované moduly senzorové sítě	41
5.2 Měření parametrů realizovaných modulů	42
5.2.1 Charakteristika napájecích zdrojů	42
5.2.2 Odběr senzorového modulu	46
5.2.3 Vlastnosti antény	47
5.3 Ukázka použití na GroveStreams	49
6 Závěr	51
6.1 Návrhy na budoucí vylepšení	51
A Seznam zkratk a symbolů	53
B Literatura	55

Obrázky

1.1 Počet celosvětově připojených IoT zařízení v období 2016-2020, zdroj [2].	1	3.18 Zapojení STM32L053C8T6 a ESP-12E	26
1.2 Vrstvy IoT architektury.	2	3.19 Wifi modul ESP8266, varianta ESP-12E	26
1.3 Poměr rozdělení IoT zařízení dle použití, zdroj [2].	2	3.20 Schéma zapojení napájecího zdroje	27
1.4 Služby poskytované Qorvo Smart Home řešením, zdroj [3].	3	3.21 Schéma zapojení napájecího zdroje	27
1.5 Vývojová deska NodeMCU s ESP8266.	4	3.22 Schéma zapojení napěťových děličů	28
1.6 Příklad vizualizace pomocí aplikace Blynk, zdroj [7].	5	3.23 Rozměry navržené PCB	29
2.1 Struktura senzorové sítě se třemi hvězdami.	7	3.24 3D vizualizace navržené PCB	29
2.2 Principiální schéma centrální jednotky	8	3.25 Struktura antény verze 001 spolu se zemnicí plochou	30
2.3 Principiální schéma senzorového modulu	9	3.26 S11 parametr odsimulované antény verze 001	30
3.1 Nucleo-L053R8 kit s BlueNRG rozšiřující deskou	11	3.27 Připojení antény senzorového modulu k vektorovému analyzátoru	31
3.2 Blokové schéma senzorového modulu	13	3.28 Anténa verze 002r5 a její 3D simulační model	32
3.3 Jednotlivé schematické bloky senzorového modulu	15	3.29 Prototypové antény verze 002rx pro ladění simulačního modelu	32
3.4 Zapojení STM32L071CBT6 a obvody napájení	16	3.30 Změna S11 parametru při různých permitivitě (simulace)	33
3.5 Detail zapojení obvodu napájení	16	3.31 Porovnání simulace se skutečností	34
3.6 Finální zapojení BlueNRG a VF prvků	17	4.1 Blokové schéma softwarového řešení	35
3.7 Odrušení krystalů pro oscilátor	18	4.2 Hlavní program senzorového modulu	36
3.8 Zapojení integrovaného balunu	18	4.3 UART výpis senzorového modulu	37
3.9 Zapojení diskretního balunu	19	4.4 Hlavní program centrální jednotky	38
3.10 Zapojení teplotního/vlhkostního čidla a akcelerometru	20	4.5 Vybrané důležité obsluhy přerušení centrální jednotky	39
3.11 Zapojení snímače intenzity osvětlení	20	4.6 UART výpis centrálního modulu	40
3.12 Závislost reverzního proudu na intenzitě osvětlení u BPW34	21	5.1 Osazená a oživená centrální jednotka na podstavci	41
3.13 Předzesilovač pro mikrofon s dolní propustí	21	5.2 Finální senzorové moduly na podstavcích	42
3.14 Rozměry navržené PCB	23	5.3 Měřicí přístroj Bode 100 od Omicron Lab	43
3.15 3D vizualizace navržené PCB	23	5.4 Připojení LDO stabilizátoru pomocí dvou SMA konektorů	43
3.16 Blokové schéma centrální jednotky	24	5.5 Impedance LDO do 5 MHz	44
3.17 Jednotlivé schematické bloky centrálního modulu	25		

5.6 Impedance LDO a spínaného zdroje do 10 MHz	45
5.7 Průběh proudu při aktivním cyklu	46
5.8 S11 parametr antény verze 002r5 na sensorovém modulu	47
5.9 Spektrum vývojového BLE kitu	48
5.10 Spektrum sensorového modulu	48
5.11 Průběh teploty v místnosti	49
5.12 Průběh relativní vlhkosti v místnosti	49
5.13 Průběh intenzity osvětlení v místnosti	49

Tabulky

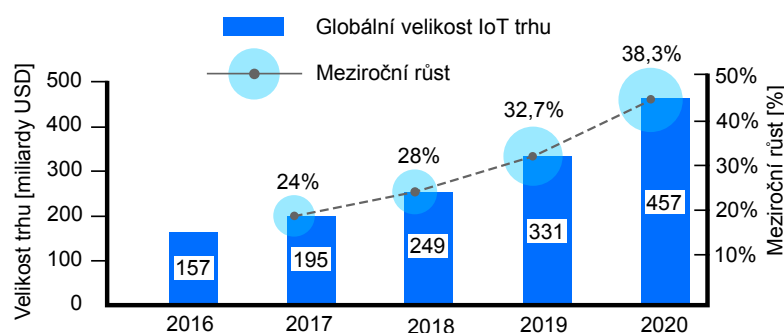
1.1 Porovnání technických specifikací Arduino UNO WiFi vs. NodeMCU, zdroj [6]	4
3.1 Parametry senzoru Si7006	14
3.2 Parametry akcelerometru IIS2DH	14
3.3 Parametry mikrofonu ABM-707-RC	14
3.4 Odhady spotřeby jednotlivých periférií v aktivním režimu	22
3.5 Závislost životnosti baterie na periodě τ	22
5.1 Rozdělení jednotlivých proudových odběrů	46

Kapitola 1

Úvod

Internet věcí (IoT) je dnes stále více uváděný termín nejenom v odborné literatuře, ale také v ostatních sdělovacích prostředcích od televize, přes časopisy až po internet samotný. Z pohledu marketingové propagace se tedy jedná o relativně novou technologii, kterou je potřeba uvést do podvědomí lidí, tj. získat si veřejnost, a tím získat i prostředky potřebné pro další rozvoj této technologie.

Po stránce technické se nejedná pouze o komunikaci a přenos dat, ale také jejich smysluplné zpracování, uložení, vyhodnocení a nakonec využití. Jedná se tedy poměrně o komplexní oblast, která má široké využití v mnoha odvětvích. Rostoucí zájem o tuto technologii a její predikci velikosti trhu je znázorněno na obr. 1.1.

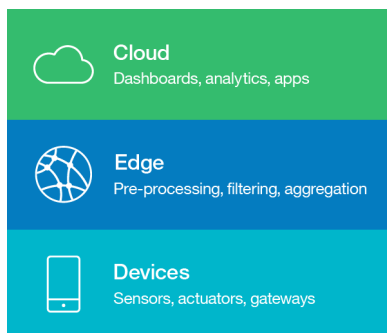


Obrázek 1.1: Počet celosvětově připojených IoT zařízení v období 2016-2020, zdroj [2].

Pozitivním aspektem pro masivní rozšiřování internetu věcí je v dnešní době dobrá dostupnost internetové konektivity po celém světě, která umožňuje téměř okamžitý přístup ke vzdálenému připojenému bodu, jako jsou např. chytrá města či budovy samotné. Možnosti využití IoT jsou tímto velmi velké.

1.1 Architektura IoT

Struktura IoT lze popsat architekturou pomocí vrstev jako je na obr. 1.2. Koncové body (tj. zařízení se senzory) běžně nemají možnost data odeslat přímo do cloudu a nebo provést složitější zpracování naměřených hodnot.

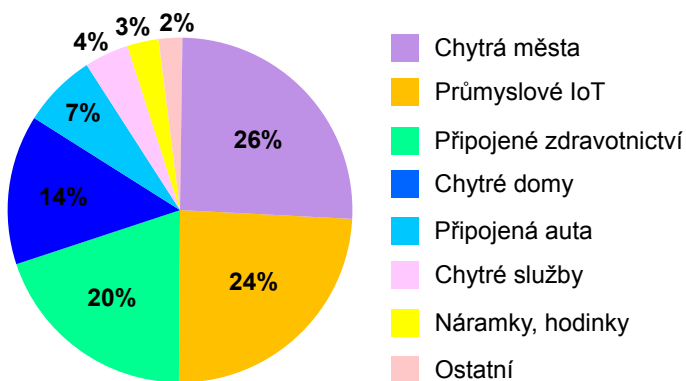


Obrázek 1.2: Vrstvy IoT architektury.

Vrstva zařízení (koncových bodů) musí splňovat několik podmínek. Jednou z nich je malá energetická náročnost (jak samotného provozu zařízení tak i komunikace). Proto se sofistikovanější zpracování dat provádí v okrajové vrstvě (edge layer), případně v cloudu, kde již nemusí být splněna podmínka nízké energetické náročnosti.

1.2 Současný stav

Rozdělení IoT je znázorněno na obr. 1.3, kde je patrné, že inteligentní budovy připojené do internetu jsou na 4. místě. Trh to rozhodně není zanedbatelný a tomu odpovídá i nabídka řešení pro sensorové sítě uvnitř budov.



Obrázek 1.3: Poměr rozdělení IoT zařízení dle použití, zdroj [2].

Jedno takové řešení, které poskytuje komplexní služby od zabezpečení domu, přes jeho monitorování, ovládání spotřebičů až po možnost automatické správy potravin v kuchyni, nabízí firma Qorvo [3].



Obrázek 1.4: Služby poskytované Qorvo Smart Home řešením, zdroj [3].

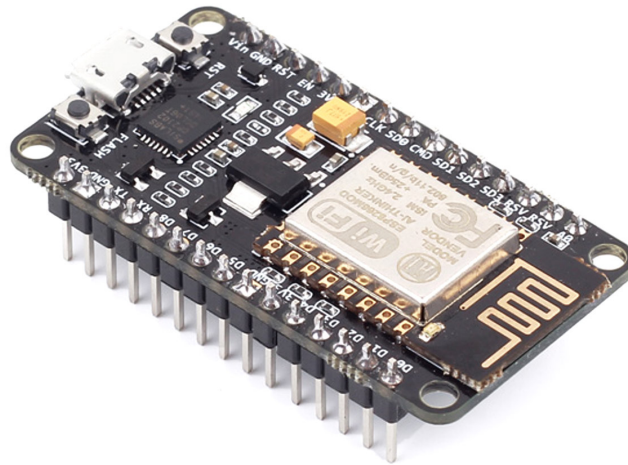
Pro nízkoenergetickou komunikaci se nejčastěji používají níže uvedené komunikační technologie:

- Zigbee 3.0 [4]
- Zigbee RF4CE
- Zigbee Green Power s energy harvesting
- Bluetooth low energy (BLE)

Komunikační dosah nízkoenergetického koncového zařízení je limitován v řádu jednotek až desítek metrů. Dosah lze navýšit využitím ad-hoc topologie, ale za cenu zvýšeného energetického odběru (zařízení musí obsloužit více komunikačních dat).

Alternativní řešení k profesionálním produktům v této oblasti můžou být DIY zařízení. V této sféře již delší dobu dominuje platforma Arduino a její obdobné deriváty. Ve spojení s komunikačními moduly, jako je wifi modul ESP8266 [23], lze snadno postavit jednoduchý i složitý IoT systém, protože SW knihovny pro práci s potřebnými periferiemi jsou k dispozici včetně dokumentace.

Pro ještě rychlejší použití existuje přímo vývojový kit NodeMCU [5], který obsahuje kromě Wi-fi modulu také podpůrné obvody pro programování a debug pomocí USB a počítače. Tento Wi-fi modul lze samostatně programovat a využívat tak přímo jeho GPIO piny bez externího MCU.



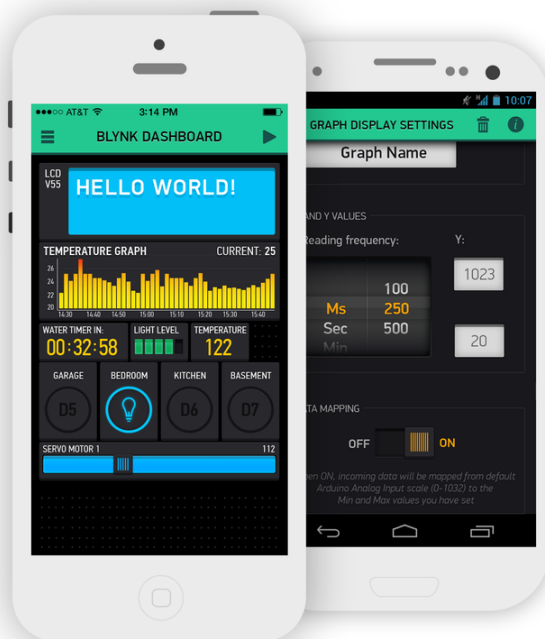
Obrázek 1.5: Vývojová deska NodeMCU s ESP8266.

Výhoda přímého použití Wi-fi modulu spočívá také v tom, že není nutná znalost vyššího programování. Modul totiž umožňuje spuštění LUA skriptů. Pokud se využije přístup vyššího programování, lze naplno využívat výkon Wi-fi modulu, tj. téměř realtime přístup na GPIO piny a také vyšší taktovací frekvenci procesoru (80 MHz) v porovnání s MCU a tím rychlejší reakce v použitém embedded systému. Detailnější porovnání NodeMCU vs. Arduino UNO WiFi (ESP8266 s externím MCU) je v tab. 1.1.

Kategorie	Arduino Uno WiFi	NodeMCU
GPIO piny	13	11
Analog piny	6	1
PWM piny	6	10
Taktovací frekvence	16 MHz	80 MHz
Pracovní napětí	5 V	3,3 V (5 V tolerantní)
FLASH paměť	32 kB	4096 kB
RAM paměť	8 kB	96 kB
GPIO pin max. proud	40 mA	12 mA

Tabulka 1.1: Porovnání technických specifikací Arduino UNO WiFi vs. NodeMCU, zdroj [6]

Softwarová podpora pro amatérské IoT projekty je tedy rozsáhlá a některé produkty se svým zpracováním blíží profesionálním. Jedná se například o mobilní aplikaci Blynk [7], kterou je možné nakonfigurovat dle požadavků daného projektu – zobrazení hodnot, tlačítka pro vzdálené ovládání, grafy a jiná vizualizace. Komplementárně k této mobilní aplikaci existuje i embedded knihovna, která je bohužel jako většina současných knihoven primárně uzpůsobena pro Arduino platformu a její použití ve vlastním SW řešení vyžaduje částečnou modifikaci. Data se z embedded jednotky neposílají přímo do mobilního zařízení, ale nejdříve do Blynk cloudu, kde zůstávají k dispozici pro mobilní aplikaci k zobrazení.



Obrázek 1.6: Příklad vizualizace pomocí aplikace Blynk, zdroj [7].

Grafický design prvků spolu s jejich rychlým použitím velmi usnadňuje vývoj amatérských zařízení nejenom pro chytré budovy. I přesto že je realizace hardwarového řešení na míru uzpůsobena danému objektu, je k dispozici vizualizační a ovládací softwarový interface, který lze s trochou úsilí použít. Tato služba zatím nemá oficiální webové rozhraní a tak interakce s koncovým IoT zařízením lze provádět pouze pomocí vytvořené mobilní aplikace.

1.3 Cíle této práce

Cílem práce je navrhnout a realizovat systém měřicí sensorové sítě dle následujících bodů:

- Systém z větší části realizován na STM technologii (MCU, BLE).
- Hierarchická struktura sítě.
- Nízké náklady na řešení.
- Sensorový modul napájen z knoflíkové baterie CR2032, optimalizovat nízký odběr pro dlouhou výdrž baterie v řádech let.
- Měřené veličiny: teplota, relativní vlhkost, intenzita osvětlení (fotodioda BPW34), hladina hluku (elektretový mikrofon), napětí napájecí baterie.
- Možnost rozšíření vstupů pro měření (např. digitální sériový port, externí analogový vstup).
- Komunikace sensorový-centrální modul pomocí bluetooth, centrální modul s WAN pomocí Wi-fi.
- Napájení centrální jednotky se záložním zdrojem a vstupem napájecího stejnosměrného napětí 8-24 V.
- Upload naměřených dat do cloudové služby GroveStreams.

Použitím BLE technologie se sníží spotřeba sensorových modulů, ale také se výrazně zmenší komunikační dosah v porovnání s Wi-fi spojením. Stabilita spojení může být také ovlivněna kvůli malému vysílacímu výkonu vzhledem k častému provozu (zarušení) na frekvenčním pásmu kolem 2,4 GHz. Při použití zpětné vazby o přijetí naměřených dat může docházet k opakovaným pokusům o odeslání a v závislosti na velikosti zarušení komunikačního prostoru také ke zvýšenému odběru zařízení. Použití BLE technologie však má svou výhodu v tom, že díky malému vysílacímu výkonu dochází potenciálně pouze k lokálnímu rušení, které není rozšířeno například do sousedních objektů. Výhodou je také rychlost komunikace, kde vysílací okno bluetooth má malou šířku (řádově burst o délce několika milisekund), což dále snižuje riziko rušení.

Spojení centrálního modulu s Wi-fi přístupovým bodem již nemusí nutně pracovat v burst režimu, protože zde není podmínka nízkého odběru zařízení.

Vzhledem k napájení sensorových modulů z knoflíkové baterie o jmenovitém napětí 3 V je nutné vybrat senzory a podpůrné obvody schopné pracovat od malého napájecího napětí (při dlouhém provozu během několika let napětí baterie rapidně klesne).

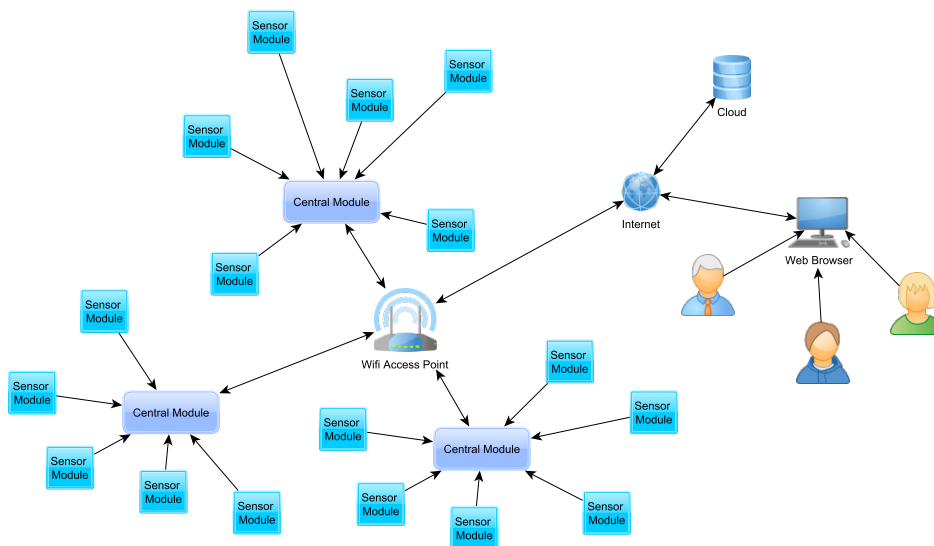
Kapitola 2

Koncepce systému

V této kapitole je popsána základní struktura senzorové sítě, centrální jednotky a jednotlivých senzorových modulů. Dále je principiálně popsán primární software a hardwarová architektura systému. Nakonec jsou uvedeny přední IoT cloudové platformy.

2.1 Struktura senzorové sítě

Navržená síťová struktura je typu strom-hvězda, kde v každé hvězdě je centrální jednotka, ke které jsou připojeny jednotlivé senzorové moduly pomocí bluetooth. Centrální jednotka je vybavena wifi modulem a komunikuje s wifi přístupovým bodem, resp. centrálním PC pro vnější přístup např. z internetu. Schématicky je struktura znázorněna na obr. 2.1.

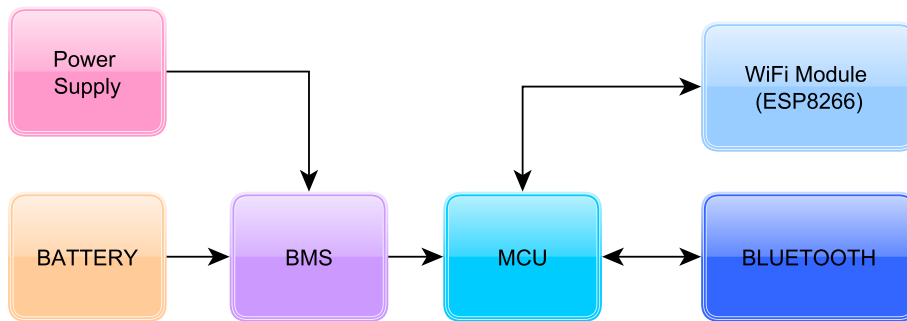


Obrázek 2.1: Struktura senzorové sítě se třemi hvězdami.

Ze struktury je patrné, že každá hvězda je vhodná právě pro jednu měřenou místnost/oblast (omezeno dosahem BT).

2.1.1 Centrální jednotka

Centrální jednotka má za úkol přijímat naměřená data z jednotlivých nízkopříkonových senzorových modulů (komunikace přes bluetooth) a tyto informace předat dále do cloudu pomocí wifi, kde je možné tato data dále spravovat pomocí webového rozhraní u dané cloudové služby.



Obrázek 2.2: Principiální schéma centrální jednotky

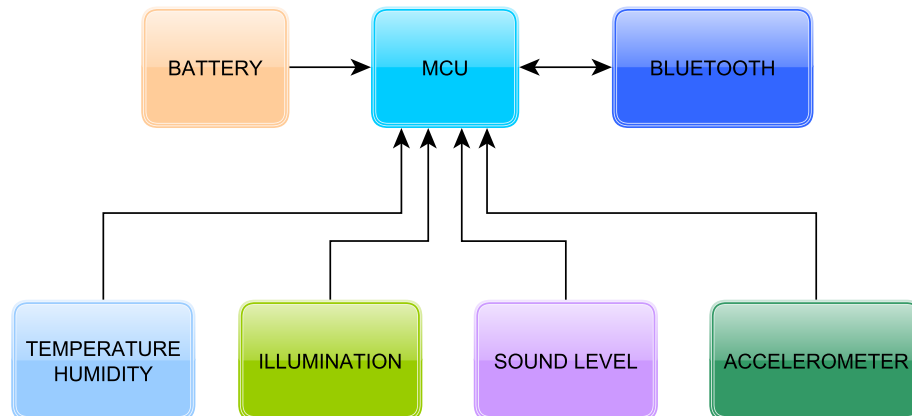
Jednotka (modul) se skládá z MCU, komunikačního bluetooth čipu, wifi modulu (ESP8266), obvodu pro správu akumulátoru (BMS), akumulátoru a napájecích obvodů. Vstupem napájení je stejnosměrné napětí v rozsahu 8-40 V. Akumulátor slouží pro provoz zařízení při výpadku napájení, aby nedošlo ke ztrátě dat ze senzorových modulů ve chvíli, kdy zrovna není k dispozici externí napájení nebo připojení k počítačové síti/cloudu. Obvod pro správu napájení akumulátoru za asistence MCU udržuje akumulátor v dobré kondici a pravidelně monitoruje jeho stav.

Wifi modul ESP8266 je připojený k wifi přístupovému bodu (jeho role je typu klient) a má na starosti upload naměřených hodnot na cloud a dále lze pomocí něj udržovat s dostatečnou přesností vnitřní čas MCU (synchronizací s NTP serverem) a zajistit tak odesílání dat do cloudu ve správném intervalu. Komunikační modul umožňuje pouze protokol HTTP/1.1, nelze se s ním tedy připojit na sítě vyžadující bezpečnostní certifikát jako je např. Eduroam.

Centrální jednotka nemusí být nutně nízkopříkonová, protože je trvale napájena ze síťového zdroje, případně ze zálohovacího akumulátoru v době výpadku hlavního napájení.

2.1.2 Senzorový modul

Úkolem senzorového modulu je změřit v daném intervalu probuzení z režimu spánku environmentální veličiny (teplotu, vlhkost, hladinu hluku, intenzitu osvětlení, případně vibrace), napětí napájecí baterie a tyto hodnoty odeslat centrální jednotce. Po odeslání dat následuje přepnutí do režimu spánku a celý cyklus se opakuje.



Obrázek 2.3: Principiální schéma senzorového modulu

Klíčové pro praktický návrh senzorového modulu je správný výběr nízkopříkonových obvodů (senzory, MCU) a také jejich rozsah napájecího napětí (problém zejména u senzoru teploty/vlhkosti).

Navržený senzorový modul by měl mít rozumnou životnost napájecí baterie z hlediska uživatelského komfortu (výměna v řádu let). Z tohoto důvodu musí mít řídicí MCU pod kontrolou napájení jednotlivých senzorů a měřit napětí baterie z důvodu zpětné vazby v nadřazeném systému, tzn. upozornění uživatele nebo správce systému na výměnu baterie v senzorovém modulu.

Pro další optimalizaci odběru zařízení je třeba vhodně zvolit způsob přídávání dat centrální jednotce pomocí BLE (více v kapitole o softwarovém řešení).

2.2 IoT cloudové platformy

Systémy pro IoT jsou na tak intenzivním vzestupu, že pro ně vzniká i celosvětová podpora od velkých softwarových společností jako je Microsoft, Google či Mathworks. Nejčastější bývá spojení paměťového prostoru v cloudu s vizualizačním systémem, ale výjimkou nebývá ani samostatná datová služba s možností externí implementace vizualizace. K dispozici jsou také hotová softwarová řešení pro instalaci na vlastní servery, např. InfluxData (pro databáze) nebo Grafana (grafický interface).

2.2.1 Otevřené IoT platformy

- ThingSpeak (nyní patří pod Mathworks)
- Dweet.io
- SiteWhere
- Freeboard.io
- InfluxData
- Grafana
- GroveStreams

Pro profesionální použití se jeví jako nejlepší použít InfluxData ve spojení s vizualizačním systémem Grafana.

V rámci demonstrace navrhovaného systému bude využita komplexní služba GroveStreams, která se pro dané téma hodí nejlépe z výše jmenovaných (z hlediska rychlosti použití umožňuje snadno vytvářet datovou strukturu pro senzorový modul).

2.2.2 Proprietární IoT platformy

Níže jsou uvedeny některé cloudové platformy od předních světových firem, které však nejsou v této práci využity.

- Google Cloud IoT
- Xively (nyní součástí Google)
- Microsoft Azure IoT Suite
- Autodesk Fusion Connect

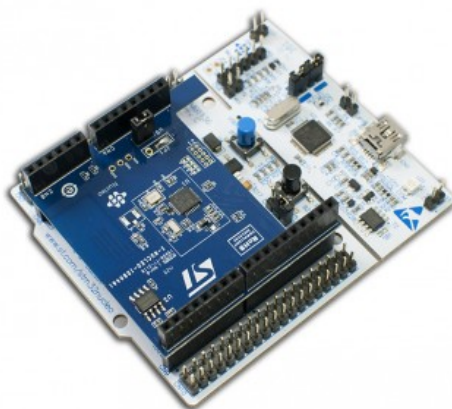
Kapitola 3

Vlastní realizace HW

Hlavním účelem této kapitoly je vysvětlení hardwarového řešení sensorového a centrálního modulu, výběr vhodných komponent, iterativní návrh bluetooth VF obvodu včetně 3D simulací a finální design PCB v Altium Designer [27]. Obzvláště návrhu VF obvodu, konkrétně PCB antény, je věnována velká pozornost, protože na něm závisí z větší části komunikační dosah modulů.

3.1 Experimenty s Nucleo STM32L053 kitem a BLE komunikace

Na kitu je použit MCU typu STM32L053R8T6, který má 64 kB FLASH paměti, 8 kB RAM a je v pouzdru LQFP-64. Procesory řady L0 se vyznačují velmi nízkou spotřebou v low power režimu STOP, kde spotřeba při 3V napájení může dosáhnout proudu $< 1 \mu\text{A}$.



Obrázek 3.1: Nucleo-L053R8 kit s BlueNRG rozšiřující deskou

Sada BlueNRG a Nucleo knihoven dodaných výrobcem byla naimportována do vývojového prostředí AC6 a doplněna o aplikační kód jenž lze pomocí přepínače SERVER/CLIENT při kompilaci přepnout na vytvoření požadovaného binárního souboru pro MCU. Aplikační vrstva je napsána tak, že ihned po za-

pnutí Nucleo kitu klientské verze vyhledají server a naváží s ním komunikaci. Poté lze na trase server/klient přenášet data. V kódu není pro tento účel implementován low power mód a budoucí komunikace se senzory na sensorovém modulu, jedná se pouze o ověření způsobu přenosu dat. Pro ověření přenosu budoucích dat bylo na každém kitu naprogramováno uživatelské tlačítko, které po stisku přepíná stav zapnutí LED diody na vzdáleném, bezdrátovém kitu (komunikace je obousměrná).

Bylo zjištěno, že HAL vrstva je poměrně náročná na programový kód a jednoduchá aplikace pro vzdálené ovládání LED diody pomocí tlačítka zabírá přibližně 34 kB programové paměti. Bohužel výrobce BLE čipu neposkytuje knihovny nezávislé na HAL vrstvě (řešením by bylo napsat si vlastní low level knihovnu). V dnešní době velkých velikostí FLASH pamětí u MCU to sice problém není, avšak u low power aplikací to zbytečně vede k delšímu vykonávání daného programu a tím pádem i větší celkové spotřebě.

■ 3.1.1 Měření dosahu BlueNRG

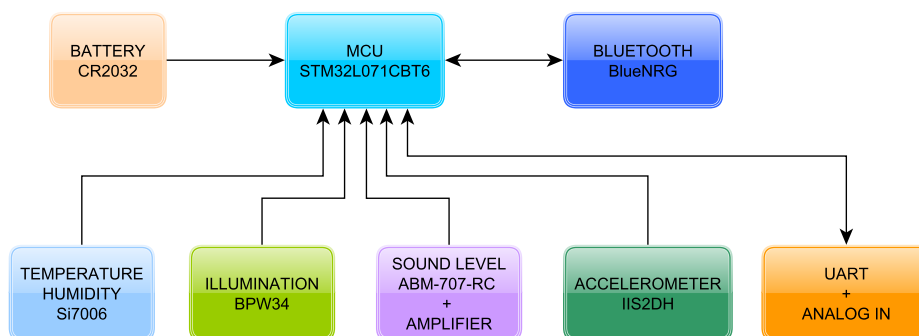
BlueNRG čip má rozmanité možnosti konfigurace. Jedna z nich je možnost nastavit výstupní vysílací výkon v rozmezí -18 až +8 dBm. Špičkový odběr se pochopitelně při zvýšeném vysílacím výkonu také zvýší. Čip byl pro měření dosahu nastaven na maximální vysílací výkon, tj. +8 dBm. Dále v aplikaci byla vytvořena jednoduchá časová smyčka, jenž s periodou 4 Hz rozsvěcuje LED diodu na protějším bezdrátovém modulu (takto bylo zajištěno jakési ověření existence spojení mezi dvěma moduly). Výsledné experimentální měření ukázalo, že v kancelářské zástavbě (kombinace nosných betonových stěn se sádkartonovými příčkami) dosáhne signál bez problému vzdálenost 25 metrů skrze dvě dvojitě sádkartonové stěny. Poté se signál skokově již ztratí, resp. přenos dat začne být nestabilní. Můžeme tedy předpokládat, že při hustější zástavbě (silnější stěny z pevnějšího materiálu) bude dosah ještě více omezen. Z tohoto důvodu budou sensorové moduly komunikovat v dané místnosti s právě jednou centrální jednotkou.

3.2 Senzorový modul

Z pohledu výběru MCU lze prakticky vybrat libovolný STM32Lxxx mikropočítač, protože všechny obsahují potřebné periferie nutné k realizaci sensorového modulu (čítače, SPI, I2C, ADC, UART...). Limitním faktorem je pouze nízká cena procesoru a velikost programové FLASH paměti. Při experimentech s vývojovým kitem se ukázala poměrně značná náročnost BLE obslužného kódu, resp. ovladačů, na velikost programové paměti. Byl vybrán typ STM32L071CBT6 [13], který má následující klíčové parametry:

- 128 kB FLASH
- 20 kB RAM
- 0,86 μA spotřeba ve STANDBY módu s RTC (wake-up)
- LQFP-32 pouzdro

Spolu s tímto MCU je v modulu bluetooth 4.1 čip BlueNRG-MS [10] v pouzdrú QFN-12. Blokové schéma návrhu sensorového modulu je na obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Blokové schéma sensorového modulu

Protože má být modul napájen z baterie CR2032, je značně omezena energetická náročnost jednotlivých sensorů a také jejich pracovní rozsah napájecího napětí. Většinou sensorů obvykle začíná minimální napájecí napětí na 2,8 V. Aby se tedy modul obešel bez měniče napětí, byly vybrány komponenty, které budou fungovat od minimálního napájecího napětí 1,8-2 V.

Senzor teploty a vlhkosti Si7006 od Silicon Labs má parametry uvedeny v následující tab. 3.1

Parametr	Rozsah	Rozlišení
Teplota [°C]	-10-85	0,01
Vlhkost [%]	0-90	0,025
Napájecí napětí [V]	1,9-3,6	-
Spotřeba [μA]	150/0,06	-

Tabulka 3.1: Parametry senzoru Si7006

Senzor je z výroby kalibrován a dokonce obsahuje topný element pro eliminaci naakumulované vlhkosti. Proud pro vytápění senzoru lze nastavit v rozmezí 3-94 mA a samozřejmě také zcela vypnout.

MEMS akcelerometr IIS2DH byl vybrán z toho důvodu, že má extrémně nízkou spotřebu, je určen do zařízení napájených z baterií a také výrobce garantuje minimálně 10 let jeho produkci.

Parametr	Rozsah	Rozlišení
Zrychlení [g]	$\pm(2 - 16)$	0,004-0,2
Napájecí napětí [V]	1,71-3,6	-
Spotřeba [μA]	11/0,5	-

Tabulka 3.2: Parametry akcelerometru IIS2DH

Navíc obsahuje dva konfigurovatelné výstupy přerušení, které jdou nastavit na různé události (pád, přemístění apod.) a je tak možné probudit celý sensorový modul v případě pohybové aktivity.

Parametry mikrofonu ABM-707-RC uvedené v tab. 3.3 se později použijí pro výpočet předzesilovače do maximální hodnoty akustického tlaku 100 dB.

Parametr	Hodnota
Citlivost [dBV]	-41±4
Napájecí napětí [V]	1,5-10
Max odběr [mA]	0,5
Impedance [kΩ]	<2,2
Odstup signál/šum [dB]	>60
Frekvenční rozsah [Hz]	50-16000

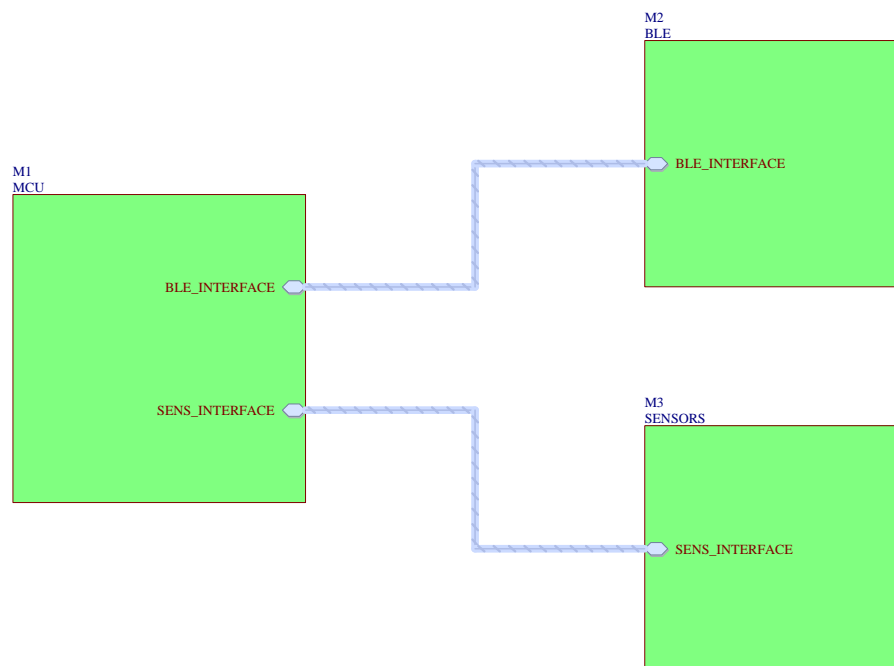
Tabulka 3.3: Parametry mikrofonu ABM-707-RC

Pro senzor osvětlení s fotodiodou BPW34 budou hodnoty součástek (sériových odporů pro dynamickou volbu rozsahu) určeny experimentálně, viz část 3.2.3.

Schéma senzorového modulu je pro lepší orientaci rozděleno do následujících tří bloků:

- MCU - mikrokontrolér a obvody napájení
- BLE - bluetooth čip a VF obvod
- SENSORS - senzory environmentálních veličin

Jednotlivé bloky senzorového modulu (obr. 3.2) jsou spojeny pomocí sběrnic, resp. svazku signálů, aby bylo schéma přehledné.

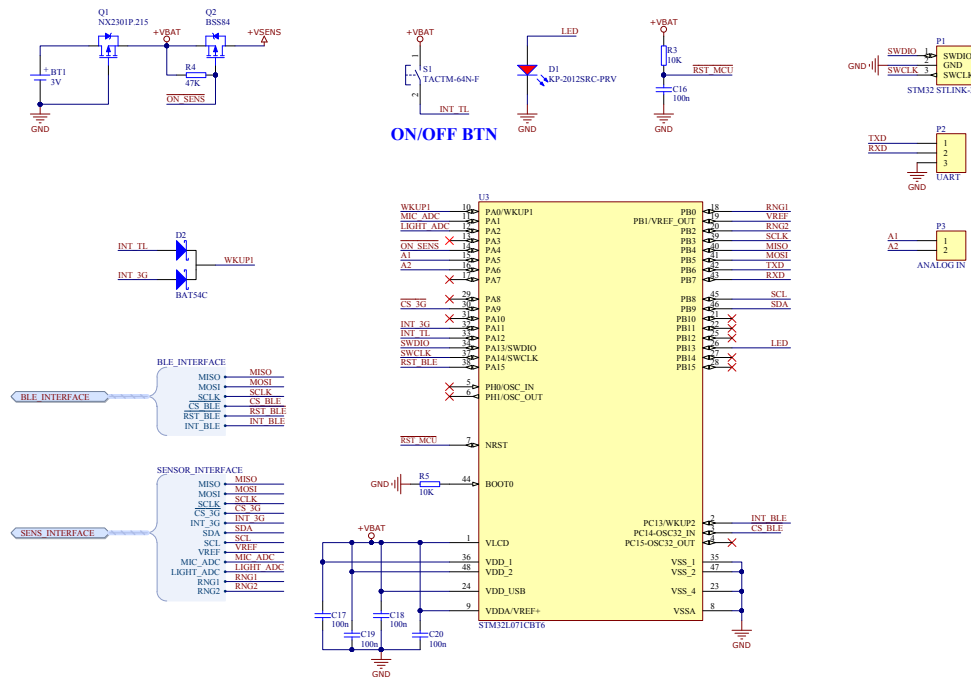


Obrázek 3.3: Jednotlivé schematické bloky senzorového modulu

Z pohledu HW jsou nejzajímavější bloky BLE a SENSORS, proto jim bude věnována větší pozornost. Blok MCU je více-méně katalogové zapojení mikrokontroléru.

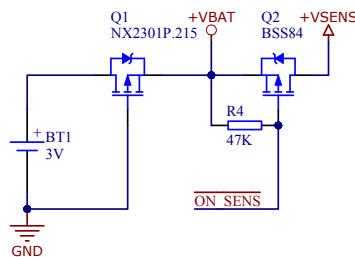
3.2.1 MCU část

Na obr. 3.4 je zapojení části s mikrokontrolérem a obvody napájení. Nejedná se o nic více nežli katalogové zapojení blokových kondenzátorů pro danou řadu L0, řízené zapínání proudu pro některé senzory (kromě MEMS akcelerometru), ochrana proti přepólování realizovaná tranzistorem Q1 (obr. 3.5), konektory pro externí dva analogové vstupy, sériovou linku a ON/OFF tlačítko sloužící k zapnutí nebo vypnutí modulu. Stav modulu je po obsluze tlačítka krátkodobě indikován červenou LED. Akcelerometr je trvale připojen na baterii z důvodu probuzení modulu, resp. MCU, pomocí změny zrychlení (vibrace, pád).



Obrázek 3.4: Zapojení STM32L071CBT6 a obvody napájení

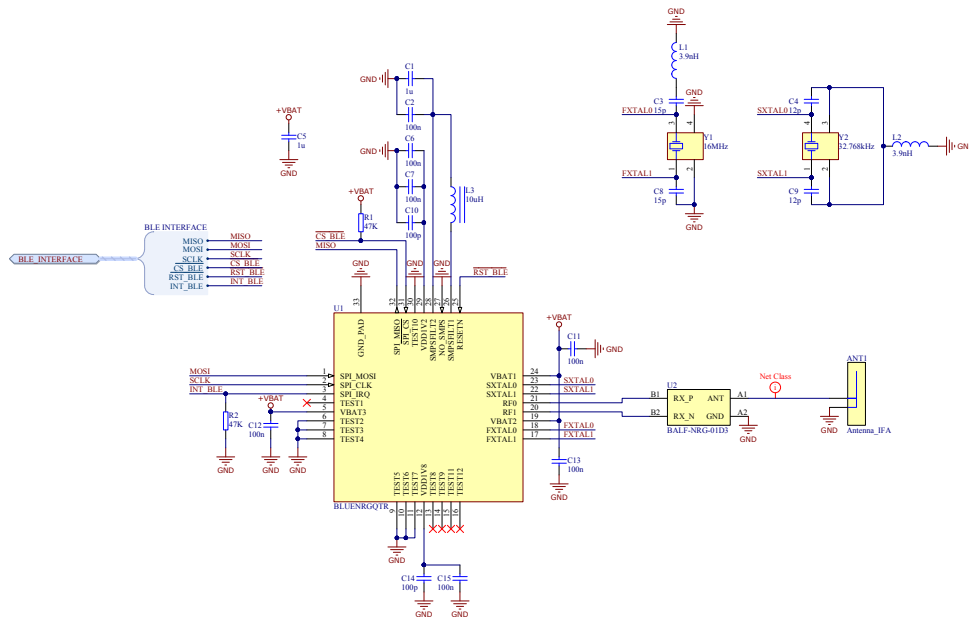
I přesto že použitý mikrořadič má 48 pinů, což se může zdát hodně, tak velká část z nich je použita v této aplikaci. Jako zdroj hodin pro MCU je použit interní RC oscilátor, protože spotřebuje méně energie v porovnání s krystalovým oscilátorem a jeho teplotní stabilita a přesnost není podstatná pro zdejší použití. Z RC oscilátoru je sice odvozena doba probuzení modulu z úsporného módu, tuto dobu je však možná externě korigovat skrz bluetooth.



Obrázek 3.5: Detail zapojení obvodu napájení

3.2.2 BlueNRG část

Zapojení bluetooth transceiveru vychází z katalogového zapojení s několika modifikacemi. První je využití integrovaného DC/DC měniče, který se aktivuje během vysílání/příjmu. Vnitřní VF elektronika je totiž napájena napětím 1,8 V a při použití vnitřních LDO stabilizátorů by na nich byla zbytečná ztráta. Měnič s externími komponentami C1, C2 a L3 má daleko větší účinnost (> 90 %). V části 3.2.4 o odhadu spotřeby energie jsou uvedeny detailní informace.



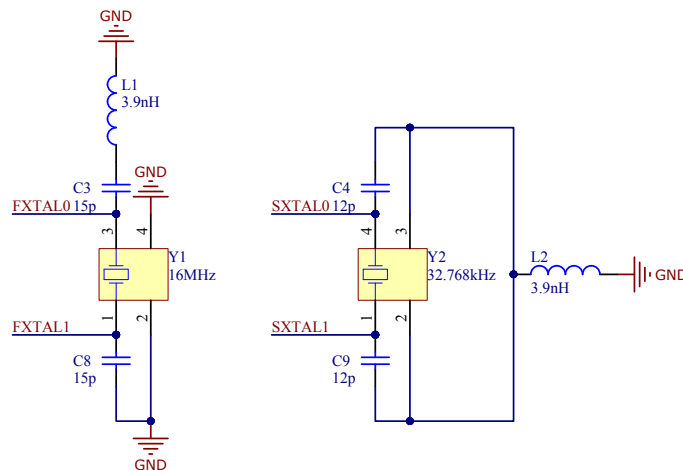
Obrázek 3.6: Finální zapojení BlueNRG a VF prvků

Obvod BlueNRG ke své činnosti potřebuje minimum pasivních součástek, které ovšem musí být zvoleny s rozvahou. Bluetooth technologie má pracovní frekvenci kolem 2,4 GHz, takže blokování napájení musí být dobře navrženo. V první řadě se to týká volby filtračních kondenzátorů (paralelní kombinace menších kapacit) k dosažení patřičně vyhlazené ESR křivky v závislosti na pracovní frekvenci a v druhé řadě rozmístění těchto blokovacích kondenzátorů na PCB, tzn. co nejblíže k VF obvodu pro eliminaci přívodní indukčnosti. Paralelní kombinace kondenzátorů 100 nF||100 pF se ukázala jako dostatečná (při provozu nedochází k výpadkům spojení).

U parazitní indukčnosti je dále potřeba počítat s velikostí součástek, kde se pro takto vysoké pracovní kmitočty volí malá SMD pouzdra. Lepší výrobci SMD součástek v datasheetu uvádějí i parazitní indukčnost a kapacitu, ještě v lepším případě přiloží i náhradní RLC schéma (týká se převážně pasivních součástek jako jsou rezistory a kondenzátory).

Konkrétní typy vybraných pasivních součástek lze vyčíst ze schematického projektu u detailu součástky.

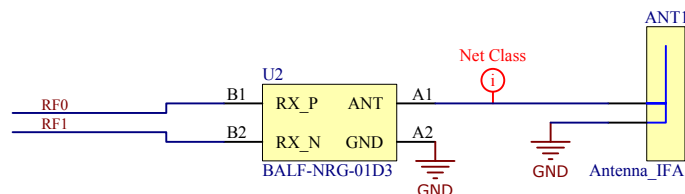
Další modifikací je stabilita krystalových oscilátorů při zapnutí VF obvodu. Nezřídka se objevil problém během inicializace VF oscilátoru, kdy došlo téměř k okamžitému výpadku komunikace. Problém byl s pronikáním VF proudu z BlueNRG čipu skrze zatěžovací kondenzátory krystalů (tedy ze země) do citlivého vstupu oscilátoru. Řešením tohoto problému je umělé zvětšení indukčnosti země u zatěžovacích kondenzátorů oscilátoru, jako je uvedeno na obr. 3.7.



Obrázek 3.7: Odrušení krystalů pro oscilátor

Cívka L1, resp. L2 se spolu s parazitní kapacitou oscilátoru/krystalu chovají jako filtr typu dolní propust a blokují tak vysokou frekvenci 2,4 GHz. Jelikož pracovní frekvence oscilátorů (16 MHz a 32 kHz) je velikostně zanedbatelná s VF frekvencí, není volba velikosti indukčnosti u L1 a L2 příliš striktní. V praxi bylo zjištěno, že u 16MHz krystalu stačí přidat cívku pouze u jednoho zatěžovacího kondenzátoru, kdežto u 32kHz krystalu je nutné mít oba zatěžovací kondenzátory připojeny přes cívku na zem (tento oscilátor má menší úroveň buzení krystalu a je tak snadnější jej zarušit).

Běžná impedance antén bývá 50 ohmů, což ovšem není výstupní impedance BlueNRG čipu. Výstup je tedy nutné před připojením k anténě přizpůsobit a zároveň provést filtraci nežádoucích harmonických kmitočtů na výstupu, aby nedocházelo ke zbytečnému rušení na jiných frekvencích (jinými slovy úspěšná certifikace [29] bluetooth zařízení). Výrobce poskytuje integrovaný symetrizační člen [12], jehož zapojení do obvodu je na obr. 3.8.

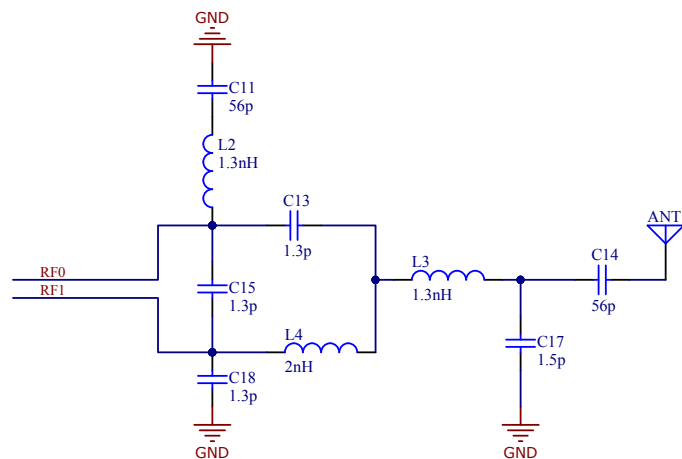


Obrázek 3.8: Zapojení integrovaného balunu

Výstup balunu vede přímo do PCB antény typu IFA, která má přizpůsobení 50 ohmů. Návrhu antény se detailně věnuje část 3.4.

Tento integrovaný balun je nejlepší řešení přizpůsobovacího členu, protože je výrobcem na míru navržen pro BlueNRG čip, je levný, má malé rozměry a není potřeba zapojení dodatečně ladit. Zároveň uvnitř obsahuje oddělovací výstupní kondenzátor, takže je zařízení chráněno proti DC proudu z antény. Jistým problémem může být složitější ruční pájení (velmi malé BGA pouzdro) a nebo nemožnost změnit výstupní impedanci (bez přidání dalších součástek).

Alternativou je balun poskládaný z diskretních součástek. Takový balun má výhodu v tom, že jej lze vytvořit i pro jinou, netradiční, impedanci nežli je 50 ohmů. Na následujícím obrázku je schéma diskretního balunu, které je převzato z [10].



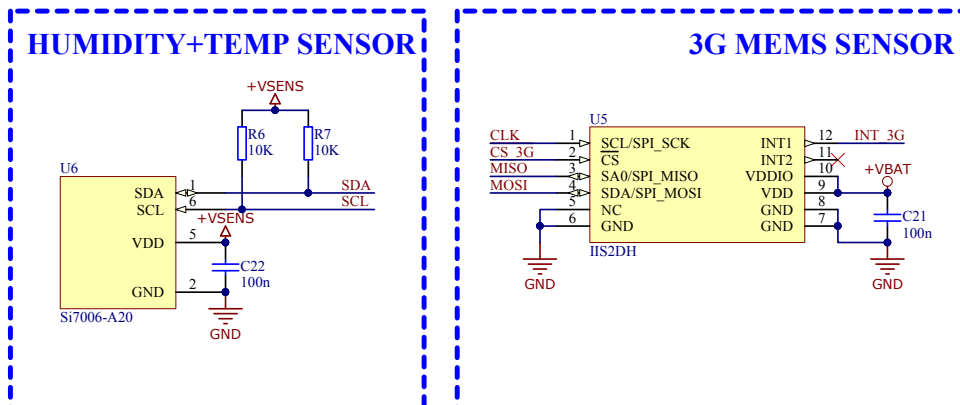
Obrázek 3.9: Zapojení diskretního balunu

Tento diskretní balun byl sestaven a otestován na jednom z prvních prototypů sensorového modulu. Výhoda je jeho snadná montáž (relativně velké SMD součástky ve srovnání s BGA balunem), pak už má ovšem samé nevýhody. Jeho parametry při tak vysoké pracovní frekvenci jsou velmi závislé na toleranci součástek a rozmístění na PCB. Při použití komponent s malou tolerancí se zase zvyšuje cena takto sestaveného symetrizačního členu.

Množství součástek zase zabírá místo na PCB, kterého na sensorovém modulu vzhledem k minimalizování konstrukce není mnoho nazbyt. Oproti integrovanému balunu je toto řešení přibližně 37x plošně větší (při použití SMD součástek v pouzdru 0402).

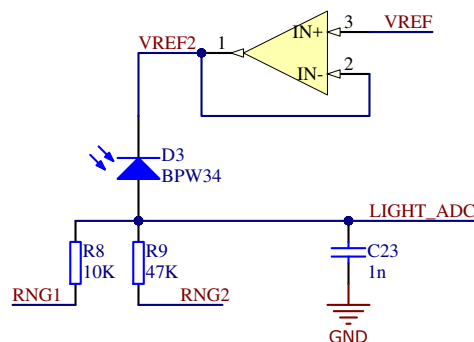
3.2.3 Senzorová část

Senzorová výbava se sestává celkem ze čtyř senzorů, z toho jsou 2 digitální a 2 analogové. Digitální část má triviální zapojení – jedná se pouze o blokovací kondenzátory v napájení a pull-up rezistory pro I2C sběrnici. Velikost pull-up rezistorů je experimentálně zvolena tak, aby komunikace se senzorem Si7006 fungovala bez chyb a zároveň aby energie zmařená na rezistorech zbytečně nevybíjela baterii. Hodnota 10 k Ω se jeví jako optimální.



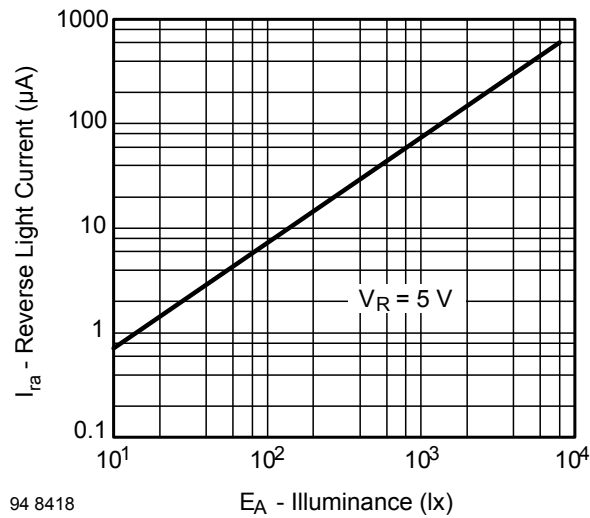
Obrázek 3.10: Zapojení teplotního/vlhkostního čidla a akcelerometru

Senzor osvětlení se sestává z fotodiody BPW34 a dvou rezistorů R8, R9 pro dynamické nastavení dvou rozsahů osvětlení. Hodnoty rezistorů byly zvoleny experimentálně tak, aby bylo možné osvětlení měřit do maximální hodnoty 2000 lux. Jejich přepínání je zajištěno přímo piny mikrokontroléru. Pro zlepšení dynamiky měření lze zapojení doplnit o více rozsahů, jelikož je stále pár pinů na mikrokontroléru k dispozici.



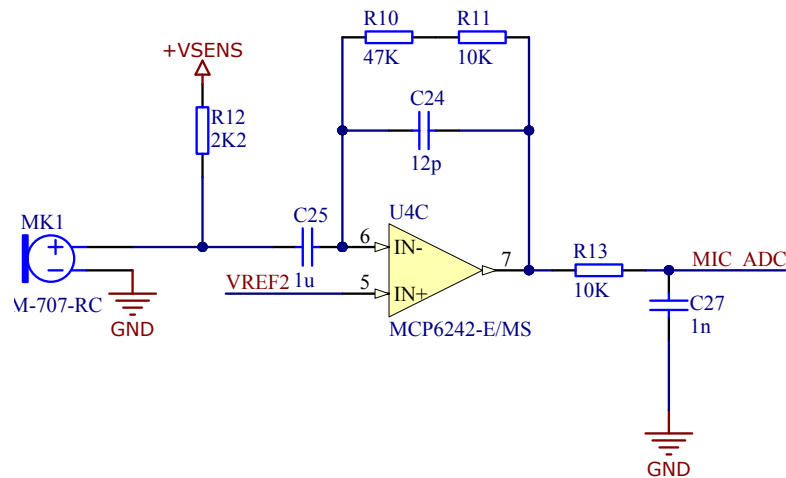
Obrázek 3.11: Zapojení snímače intenzity osvětlení

Vzhledem k provozování fotodiody v daném zapojení s kladným předpětím se využívá VA charakteristiky ve 3. kvadrantu (obr. 3.13 a výstup je v závislosti na osvětlení lineární. Část operačního zesilovače U4B slouží jako buffer pro předpětí fotodiody, neboť referenční napěťový výstup z ADC převodníku lze zatížit proudem pouze 1 μ A. Operační zesilovač MCP6242 [18] má rail-to-rail vstup i výstup a odběr pouze 50 μ A pro jednu jeho polovinu.



Obrázek 3.12: Závislost reverzního proudu na intenzitě osvětlení u BPW34

Druhá polovina operačního zesilovače U4C slouží jako předzesilovač ze snímacího mikrofону [16]. Zesílení předzesilovače bylo navrženo pro maximální intenzitu akustického tlaku 100 dB. Výpočetní model mikrofónu a návrh pasivních součástek okolo operačního zesilovače byl převzat z [20].



Obrázek 3.13: Předzesilovač pro mikrofón s dolní propustí

Pro filtraci vyšších akustických kmitočtů z okolí (ultrazvuk) je součástí mikrofónního předzesilovače pasivní dolní propust prvního řádu (R13, C27), kde hodnota mezní frekvence je dána ze vztahu:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC}$$

V této konfiguraci zapojení je to ≈ 16 kHz.

3.2.4 Odhad životnosti baterie

Z vybraných nízkopříkonových součástek lze nyní odhadnout jejich jednotlivou spotřebu v aktivním režimu a spánku. Tyto údaje jsou v tab. 3.4 a jsou získány z katalogových údajů výrobců těchto součástek. Čas aktivního režimu byl zvolen 20 ms z důvodu průměrování hodnot ze senzoru osvětlení a také vzorkování signálu z mikrofону pro začátek rozsahu 50 Hz.

Periferie	Spánek [μA]	Odběr [mA]	Čas [ms]	Energie [μJ]
BLE	1,7	15	0,3	4,5
STM32L053	0,41	1,55	20	31
ADC BAT	0	0,2	20	4
Si7006	0	0,24	20	4,8
IIS2DH	0,5	0,011	20	0,22
MCP6242	0	0,1	20	2
MIC	0	0,5	20	20
Celkem	2,610	17,601	-	56,520

Tabulka 3.4: Odhady spotřeby jednotlivých periferií v aktivním režimu

Pro výpočet odhadu životnosti baterie (T [rok]) v ostrém provozu lze použít následující rovnice, které kombinují vybíjení baterie ve spánkovém (E_p [J]), aktivním režimu (E_{A0} [J]) a také parametr samovybíjení (D [%]).

$$E_0 = C \cdot 3600 \quad (3.1)$$

$$E_p = I \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 \quad (3.2)$$

$$E_A = \frac{E_{A0} \cdot \tau}{60 \cdot 24 \cdot 365} \quad (3.3)$$

$$T = \frac{E_0}{(E_A + E_P) \cdot 0,7^{-1} + \frac{C \cdot D}{100}} \quad (3.4)$$

Kde τ [min] je perioda probuzení modulu z režimu spánku, C kapacita baterie, E_0 energie uložená v baterii a E_{A0} energie spotřebovaná během aktivní činnosti. Hodnota 0,7 v rovnici 3.4 představuje opotřebení baterie (zvětšení ESR) vlivem pulzního odběru a je převzata ze studie [19].

Pro běžnou kapacitu CR2032 baterie (225 mAh), samovybíjení 1 %/rok, probouzeční periody 15 minut a odběry uvedené v tab. 3.4 je životnost baterie 6 let. Za tuto dobu napětí baterie poklesne na hodnotu 2 V. Zajímavá je závislost životnosti baterie na probouzeční periodě (τ), která je pro některé hodnoty uvedena v tab. 3.5.

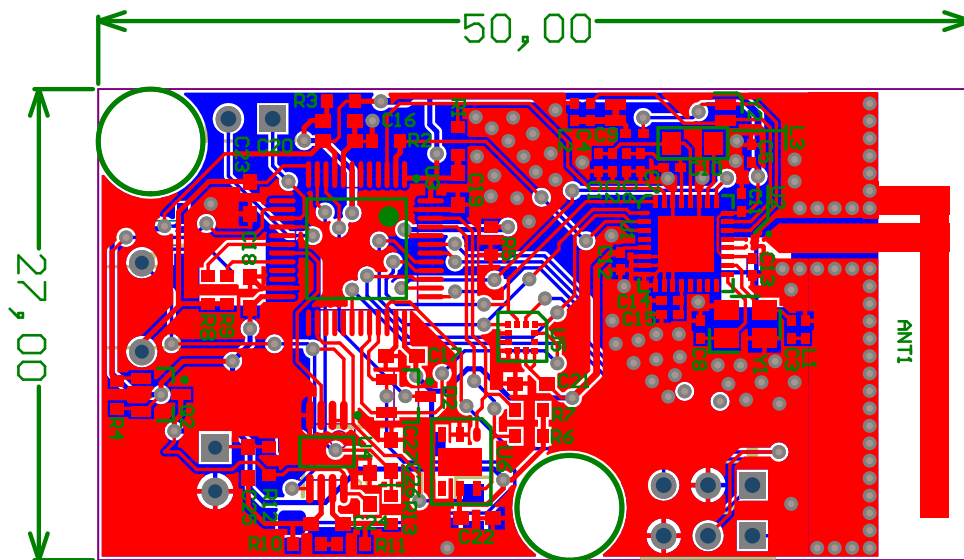
τ [min]	5	10	15	30	45	60
Výdrž [roky]	6,037	6,234	6,303	6,373	6,397	6,409

Tabulka 3.5: Závislost životnosti baterie na periodě τ

Z uvedené tabulky je zřejmé, že samotný aktivní cyklus baterii příliš nevyčerpává na rozdíl od kontinuálního pasivního režimu. Podobná závislost je i pro čas aktivního režimu. Lze tedy tvrdit, že senzorový modul může provádět delší periody měření aniž by tím nějak výrazně snižoval životnost baterie.

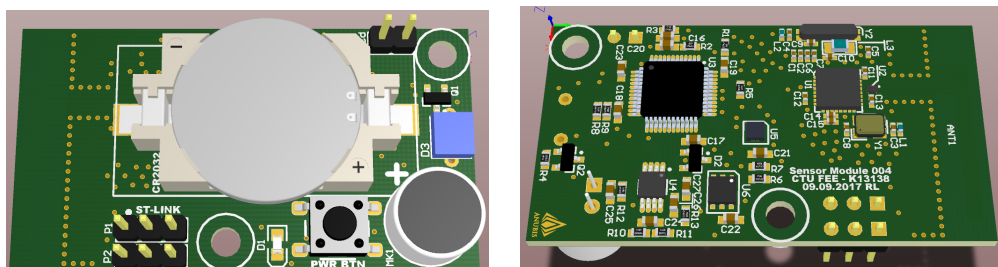
3.2.5 Návrh PCB

Rozměry navržené PCB jsou 50x27 mm, tedy jen o několik málo milimetrů více nežli je pouzdro pro CR2032 baterii. Větší velikost je způsobena umístěním antény pro bluetooth, kolem které musí být určité místo aby nedocházelo k nadměrnému ovlivnění VF signálu.



Obrázek 3.14: Rozměry navržené PCB

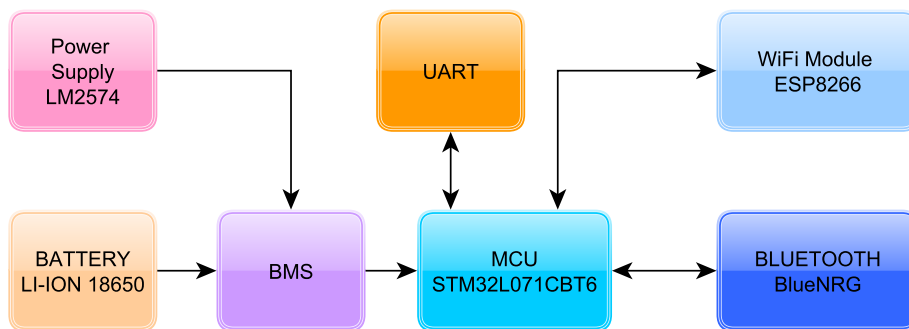
Na obr. 3.15 lze vidět reálný render PCB a porovnání velikostí jednotlivých komponent. Zároveň si lze všimnout prázdného místa vedle držáku pro baterii, kde je právě umístěna anténa.



Obrázek 3.15: 3D vizualizace navržené PCB

3.3 Centrální jednotka

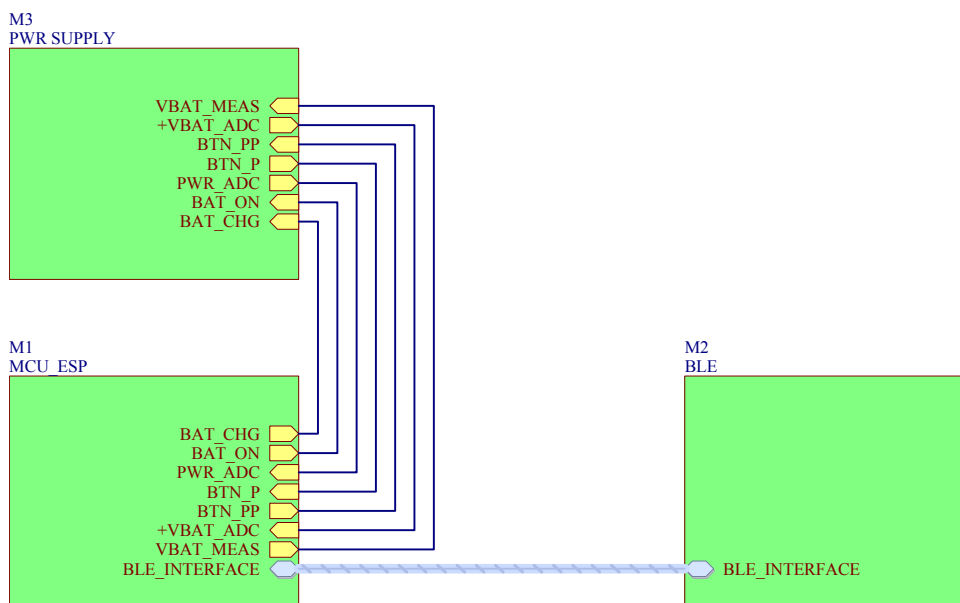
Stejně jako u sensorového modulu, tak i zde je srdcem STM32L071CBT6 [13] v LQFP-48 pouzdru spolu s bluetooth 4.1 čipem BlueNRG-MS [10] v pouzdru QFN-12. Jak je patrné z blokového schématu na obr. 3.16, centrální modul kromě komunikačních periferií bluetooth/WiFi, napájecího zdroje, zálohovací akumulátoru, elektroniky pro jeho nabíjení obsahuje ještě interface sériové UART linky. Stejně jako sensorový modul, tak i centrální je vybaven uživatelským sériovým portem pro nezávislý datový (textový) výstup.



Obrázek 3.16: Blokové schéma centrální jednotky

Jako záložní akumulátor byl vybrán běžně dostupný typ Li-Ion 18650 (nejvíce produkováný akumulátor na světě – používá se například do notebooků). Jeho výhodou je poměrně nízká pořizovací cena a velká hustota energie. Více detailů o zapojení BMS je v části 3.3.2.

Schéma centrálního modulu je rozděleno do tří bloků. Řídicí blok M1 obsahuje mikrokontrolér s WiFi ESP-12E [23] modulem, blok M2 standardní zapojení BlueNRG totožné jako u senzorového modulu v části 3.2.2 a nebude tedy dále popisován. Blok M3 je prakticky napájecí část se vstupním spínaným zdrojem, záložním akumulátorem a obvody jeho dobíjení (BMS).

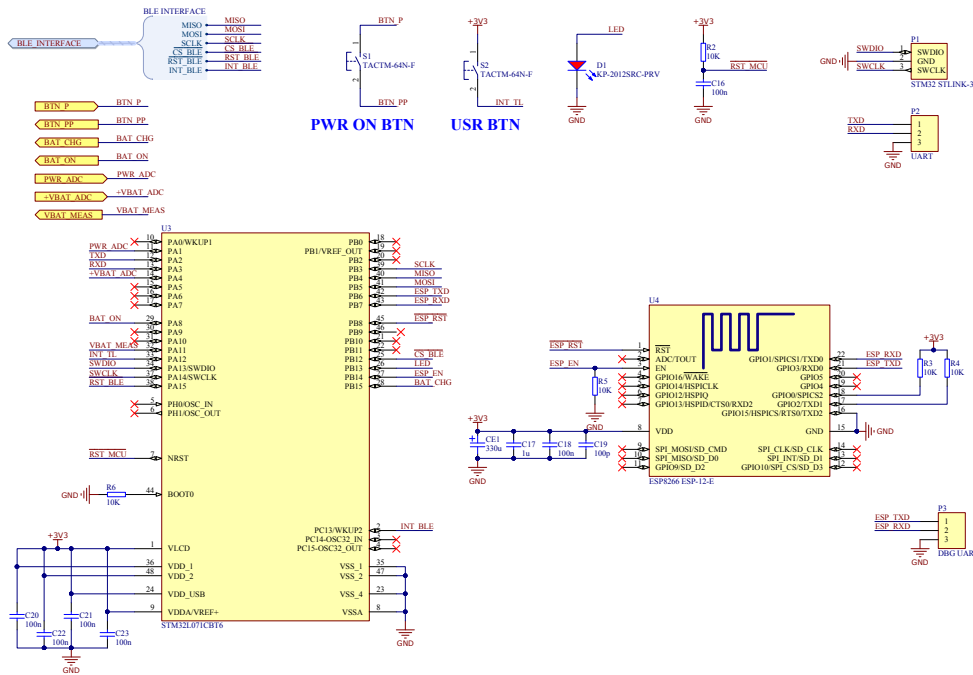


Obrázek 3.17: Jednotlivé schematické bloky centrálního modulu

Ze schématu je zřejmé, že blok M1, resp. mikrokontrolér, se stará o řízení napájení a také detekci výpadku hlavního napájecího zdroje. Při výpadku hlavního zdroje dojde na přepnutí napájení ze záložního akumulátoru. Mikro-počítač neustále hlídá napětí akumulátoru a řídí tak jeho nabíjecí/vybíjecí cyklus. V případě provozu bez síťového napájecího zdroje a poklesu napětí akumulátoru pod nastavenou mez dojde k vypnutí centrálního modulu. Modul je pak možné znovu zapnout buď obnovením přívodu proudu přes síťový zdroj a nebo „startovacím“ tlačítkem pro provoz z akumulátoru. Výdrž akumulátoru byla vypočítána podobně jako pro senzorový modul, avšak pro kapacitu 2 Ah a daleko větší odběr (WiFi má spotřebu až 150 mA). V tomto případě vydrží centrální jednotka běžet 9 hodin od plně nabitého záložního akumulátoru.

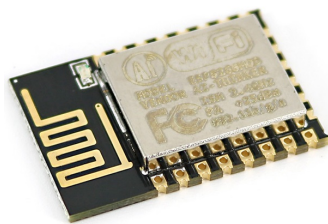
3.3.1 MCU a Wi-fi část

Na obr. 3.18 je zapojení části s mikrokontrolérem a Wi-fi modulem. Jedná se opět o katalogové zapojení blokovacích kondenzátorů pro mikrokontrolér řady L0 a ESP-12E modul. Zapojení je doplněno o dvě funkční tlačítka, kde S1 slouží pro zapnutí zařízení pouze při napájení z akumulátoru a S2 je uživatelsky konfigurovatelné.



Obrázek 3.18: Zapojení STM32L053C8T6 a ESP-12E

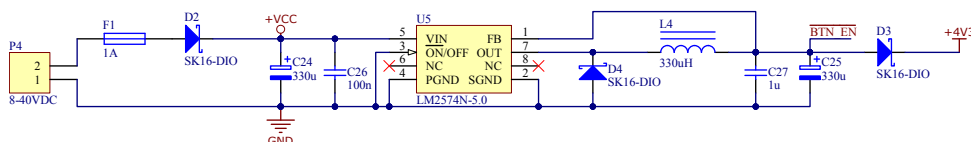
ESP8266 je levný wifi modul s UART rozhraním a komunikace probíhá přes AT příkazy. Velikost modulu je 15x25 mm, dosah ve volném prostoru cca 360 metrů a cca 60 metrů v cihlovém domě.



Obrázek 3.19: Wifi modul ESP8266, varianta ESP-12E

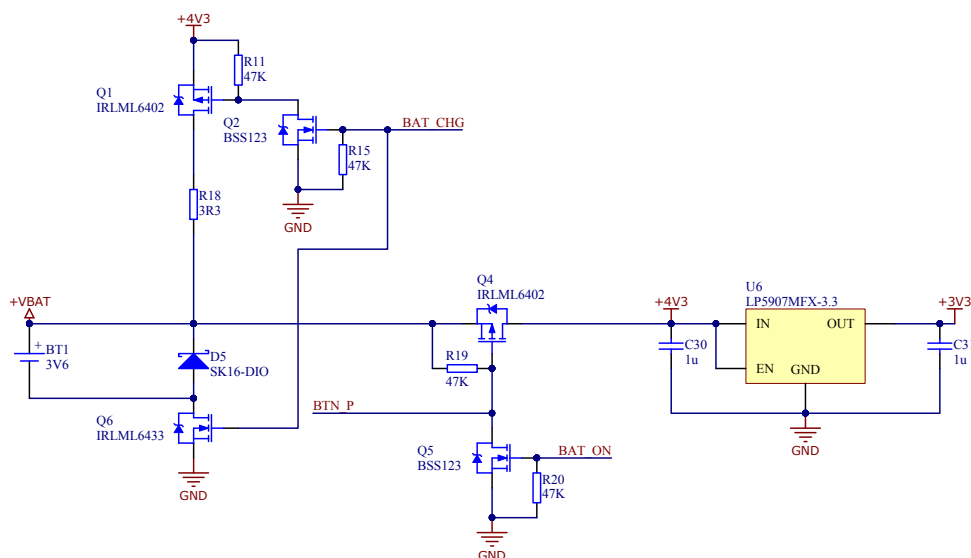
3.3.2 Obvody napájení

Napájecí obvod začíná vstupním napájecím spínaným zdrojem LM2574 jehož schéma je na obr. 3.20. Je to standardní zapojení tohoto zdroje doplněné o ochranu proti přepólování a zpětný proud z akumulátoru při vypnutém hlavním napájení. Napájecí zdroj má široké spektrum vstupního stejnosměrného napětí v rozmezí 8-40 V.



Obrázek 3.20: Schéma zapojení napájecího zdroje

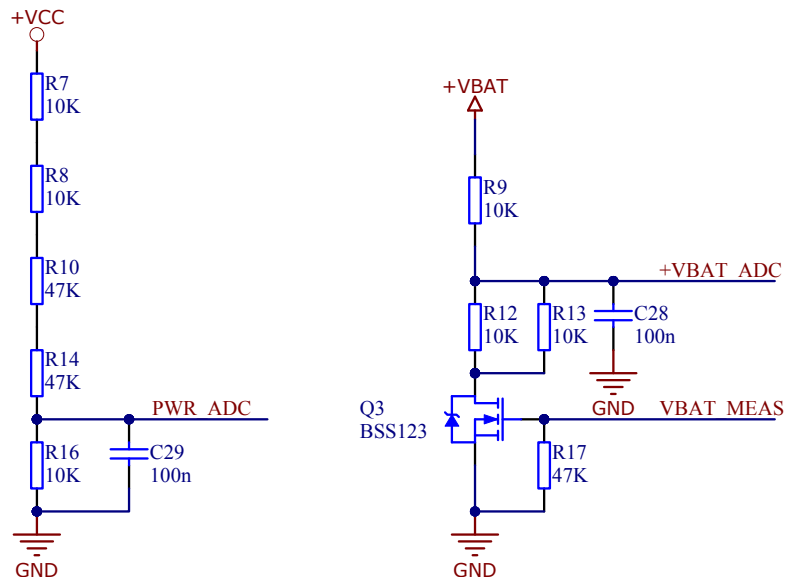
Další část je samotný výkonový obvod správy napájení akumulátoru (BMS) umožňující dobíjení akumulátoru, případně jeho připojení/odpojení jako záložního zdroje. Jelikož plně nabitý Li-Ion akumulátor má napětí 4,25 V, je do cesty ještě zařazen LDO stabilizátor LP5907MFX-3.3 [17], který má úbytek pouze 120 mV při proudu 250 mA.



Obrázek 3.21: Schéma zapojení napájecího zdroje

Omezení nabíjecího proudu je řešeno rezistorem R18 a v průměru odpovídá hodnotě 100 mA. V praxi by tedy nabíjení 2Ah akumulátoru teoreticky trvalo 20 hodin. Takto nízká hodnota proudu je zvolena vzhledem k celkovému odběru zařízení a předpokladu, že výpadky hlavního napájecího zdroje nebudou časté.

Dále napájecí část obsahuje napěťové děliče s výstupy PWR_ADC a +VBAT_ADC, které jsou napojeny do mikrokontroléru na napěťový komparátor a vstup ADC pro měření napětí akumulátoru. Díky rychlému komparátoru a nastavení mezní hodnoty 5,3 V dojde k rychlému přepnutí napájení na záložní akumulátor při poklesu napětí na vstupní straně napájecího zdroje.

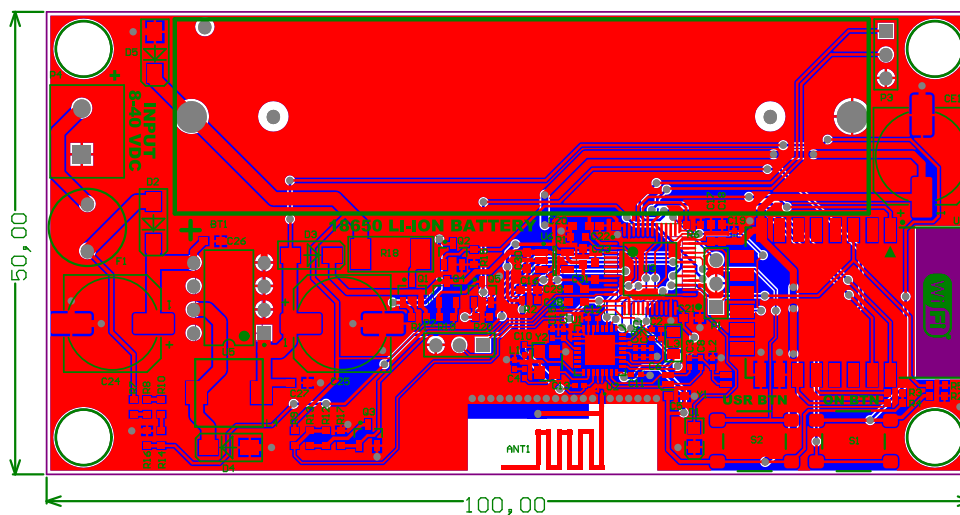


Obrázek 3.22: Schéma zapojení napěťových děličů

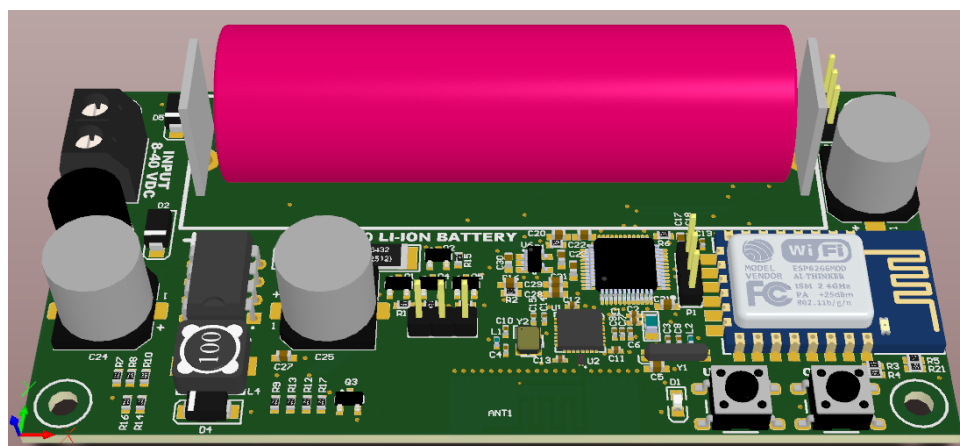
Napěťový dělič pro měření stavu akumulátoru je odpojitelný pomocí tranzistoru Q3. Akumulátor tedy není po celou dobu provozu zatížen odporovým děličem, ale pouze během měření jeho napětí.

3.3.3 Návrh PCB

Rozměry navržené PCB jsou 100x50 mm a deska je pouze jednostranně osazena (levnější strojové osazení). Na desce se opět nachází PCB anténa pro bluetooth. Z důvodu snížení rizika vzájemného rušení bluetooth a Wi-fi jsou jednotlivé VF části od sebe vzdáleny a geometricky otočeny o 90 °.



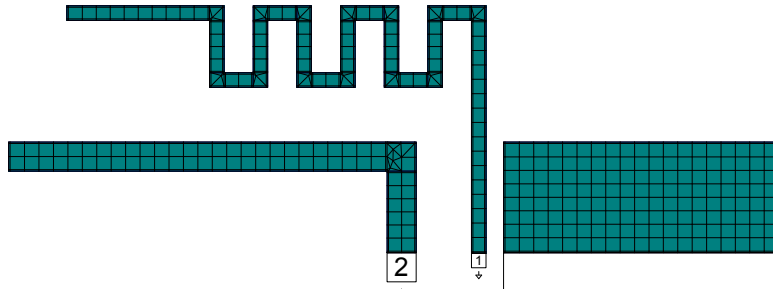
Obrázek 3.23: Rozměry navržené PCB



Obrázek 3.24: 3D vizualizace navržené PCB

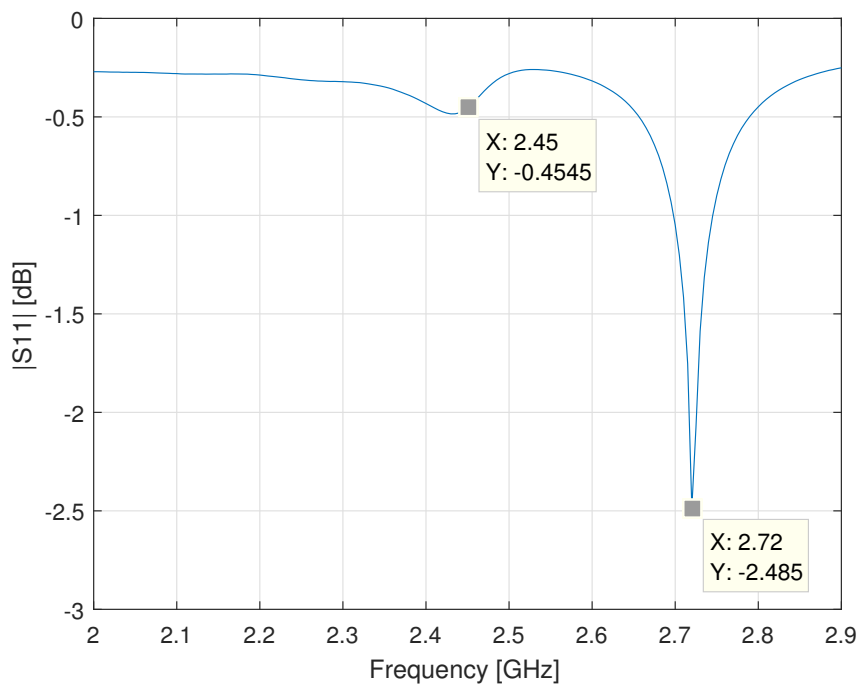
3.4 Návrh PCB antény

Anténa pro bluetooth byla z důvodu malé výrobní ceny a lepších vyzařovacích vlastností zvolena v provedení na plošném spoji. Technologie BLE funguje na relativně vysoké frekvenci v oblasti 2,4 GHz, kde navrhovat VF obvody je již poměrně obtížné, a proto pro úspěšný návrh antény bylo použito simulačního balíku AWR Design Environment [26]. Vytvořenou 2D strukturu antény s mesh mřížkou pro FEM simulaci lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 3.25: Struktura antény verze 001 spolu se zemnicí plochou

Na anténu a zemnicí plochy byly připojeny porty pro správné buzení VF signálem a měření S-parametrů.

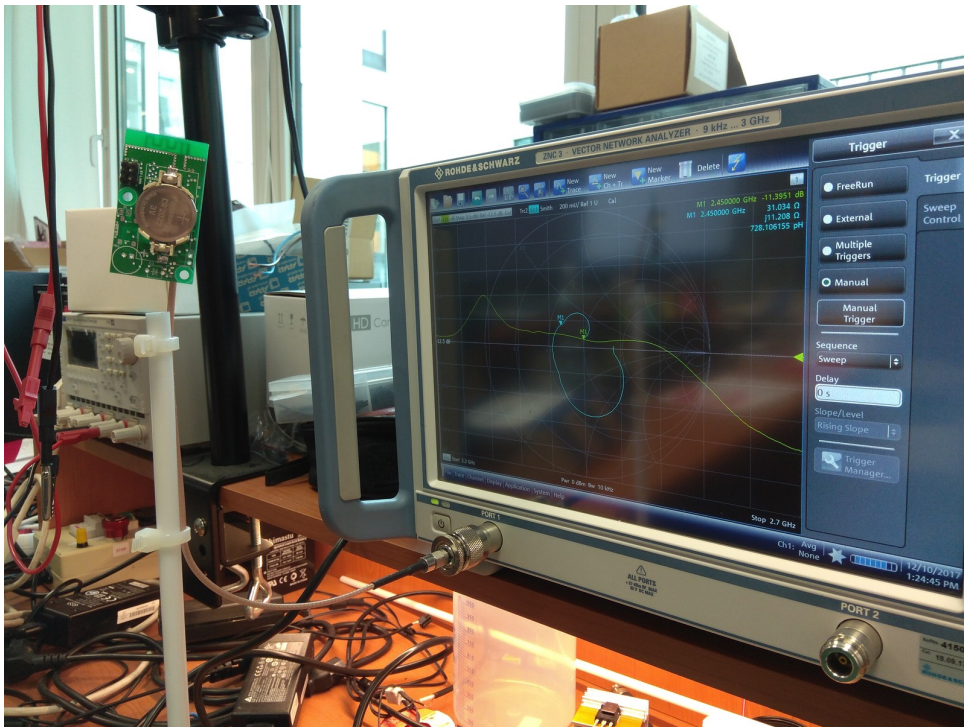


Obrázek 3.26: S11 parametr odsimulované antény verze 001

Z výsledku simulace na obr. 3.26 vyplývá, že na požadované frekvenci se přibližně 90 % signálu odrazí zpět do vysílače. Jelikož má vysílací čip malý

výstupní výkon, anténa vyzáří do prostoru signál, který se svou velikostí prakticky ztratí v šumu pozadí. Jak je dále z grafu patrné, tak anténa nedosahuje příznivého S11 parametru ani při „přizpůsobené“ frekvenci 2,6 GHz. Je nutno dodat, že simulace je velmi citlivá na nastavení parametrů jednotlivých vrstev PCB (vlastnosti dielektrika, tloušťka spojů, tloušťka laku). Ostatně, v praxi se ukazuje, že simulovat VF struktury většinou přináší zcela jiné výsledky, než je realita. Proto byly skutečné parametry antény proměřeny na vektorovém analyzátoru ZNC [25].

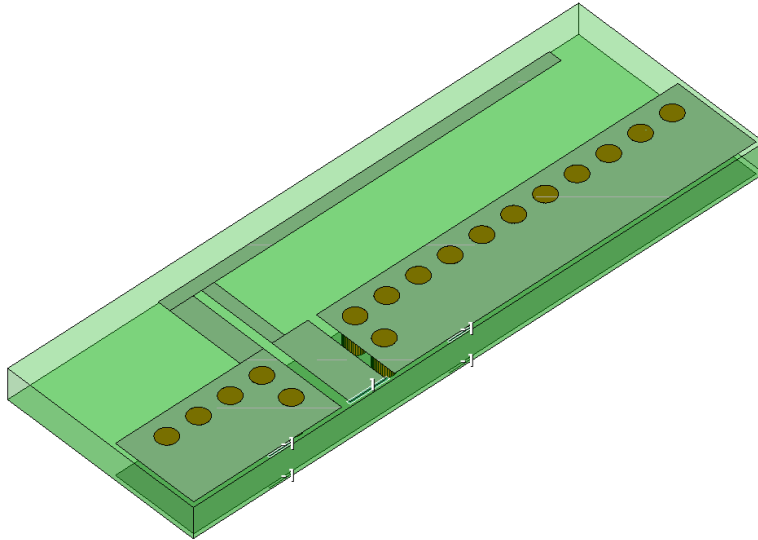
Aby bylo měření co nejpřesnější, byl vytvořen jednoduchý stojan z teflonového materiálu (obr. 3.27) pro měřený sensorový modul, resp. anténu. Tímto se dosáhne definované polohy antény ve volném prostředí pro porovnávací měření modifikací antény za účelem naladění antény na pracovní kmitočet.



Obrázek 3.27: Připojení antény sensorového modulu k vektorovému analyzátoru

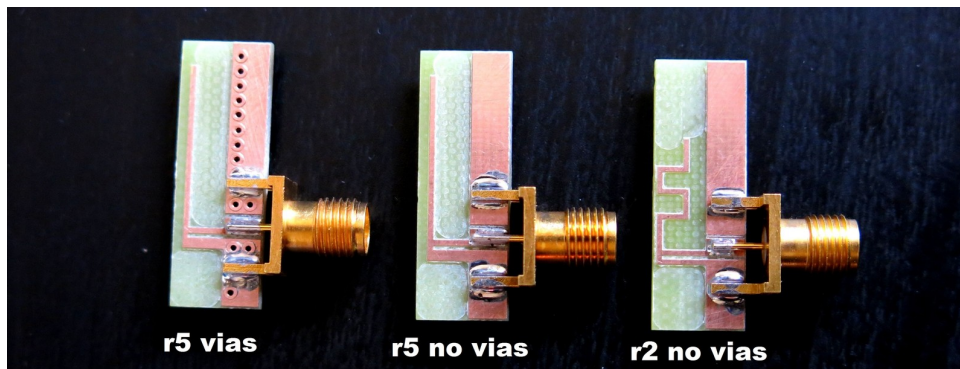
Senzorový modul byl dále osazen pouzdrem pro baterii a samotnou baterií CR2032, protože baterie je v blízkosti antény a má vliv na její vlastnosti. Vektorový analyzátor byl před měřením zkalibrován normály (match 50 Ω , open a short).

Výsledky 2D simulací se bohužel ani z části neblížily realitě změřené vektorovým analyzátozem. Bylo tedy potřeba simulaci přiblížit realitě, tj. vytvoření simulačního scénáře pro simulaci v reálném prostoru. Anténa byla překreslena do 3D prostoru a zároveň vznikla i její nová verze 002. Tato anténa je typu IFA a její podoba, konkrétně revize 5, je na obr. 3.28.



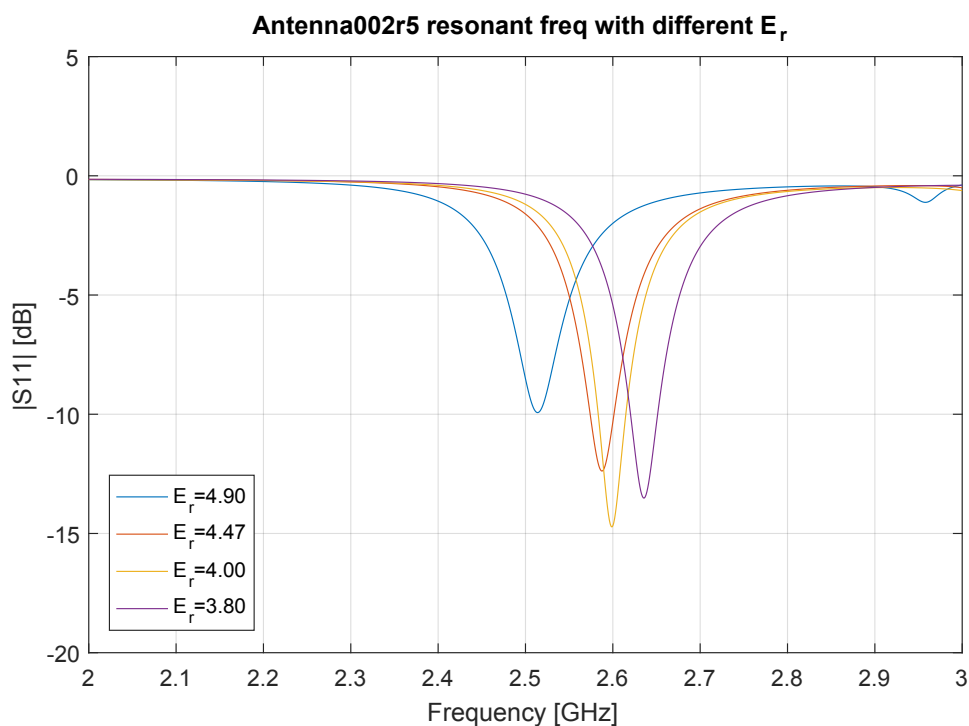
Obrázek 3.28: Anténa verze 002r5 a její 3D simulační model

Tento typ IFA antény byl zvolen z důvodu velké odolnosti proti rozladění vlivem blízké přítomnosti kovových předmětů a také snadného naladění – oproti meandrové anténě je zde méně stupňů volnosti. Pro experimentální úpravu simulačního modelu byly vytvořeny jednoduché prototypy antén (obr. 3.29), které rozměrově odpovídaly 3D modelu.



Obrázek 3.29: Prototypové antény verze 002rx pro ladění simulačního modelu

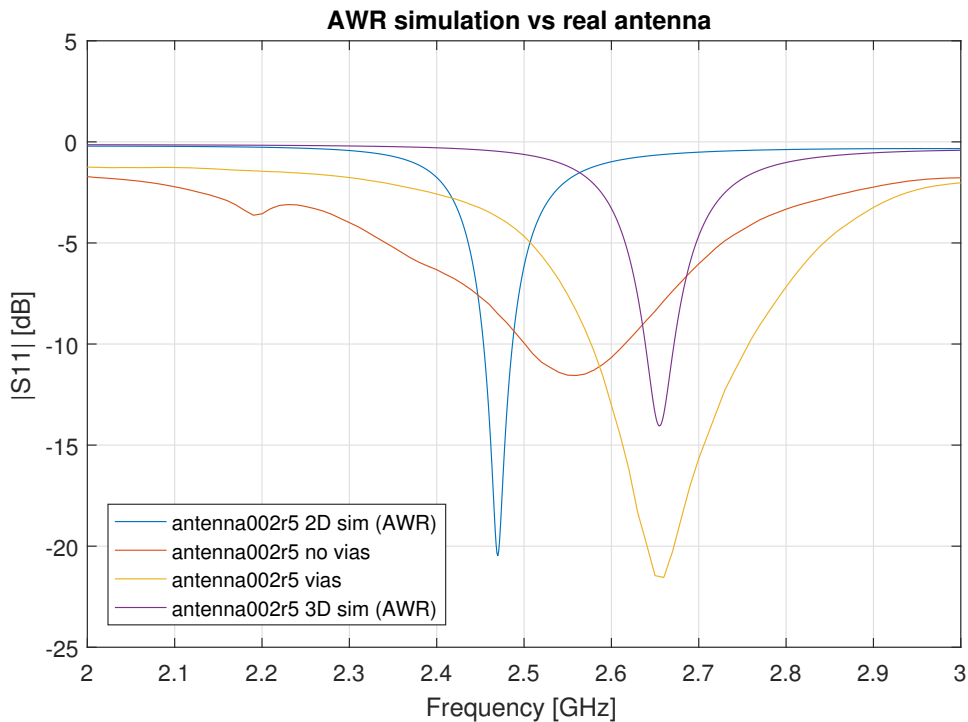
Parametry realizované PCB antény na standardním FR-4 materiálu jsou nejvíce ovlivnitelné relativní permitivitou FR-4 substrátu. Materiál svou permitivitu mění nejenom s teplotou a pracovní frekvencí, ale také výrobce od výrobce má jiné hodnoty. Permitivita se dokonce může lišit i v různých sériích od stejného výrobce. Následující simulace a porovnání s realitou budou primárně zaměřeny na verzi antény 002r5 s prokovy, protože se tato varianta při experimentech projevila nejslibněji.



Obrázek 3.30: Změna S11 parametru při různé permitivitě (simulace)

Nejčastěji se hodnota relativní permitivity materiálu FR-4 nachází v oblasti kolem hodnoty 4,2 a běžně kolísá $\pm 0,2$. Z grafu na obr. 3.30 lze vyčíst, že pokud se anténa navrhne pro nejlepší přizpůsobení na hodnotě relativní permitivity 4, bude mít výrobní rozptyl permitivity malý vliv na přizpůsobení. Jako hraniční hodnotu S11 lze v tomto případě zvolit -10 dB, tedy 90% propustnost signálu.

Simulační prostorový model byl lehce upraven skutečnou permitivitou dielektrika, aby se jeho výsledky přiblížily realitě. Dále byla reálná permitivita přidána i do 2D simulace pro porovnání. Na následujícím grafu je hned několik průběhů ze simulací a z měření na vektorovém analyzátoru.



Obrázek 3.31: Porovnání simulace se skutečností

Z reálného měření antén nejdříve vyplývá, že nemá moc smysl navrhovat anténu bez prokůvů do země v blízkosti vyzářovacího prvku. Prokůvy zajišťují dobré spojení pro VF proudy – paralelní kombinace malých prokůvů snižuje parazitní indukčnost výsledné trasy.

Simulace v obou případech (2D a 3D) vykazují menší šířky pásma oproti reálnému měření. V praxi má větší šířka pásma, jako je na naměřených grafech, pozitivní efekt pro lepší přizpůsobení na pracovní frekvenci, tzn. že i při kolísání permitivity dielektrika bude výsledné přizpůsobení antény dobré. Nevýhoda větší šířky pásma je ta, že anténa bude vysílat nejenom na pracovní frekvenci, ale také na frekvencích způsobených jitterem oscilátoru. Tento problém z větší části řeší integrovaný balun, který v sobě obsahuje pásmovou propust na pracovní frekvenci.

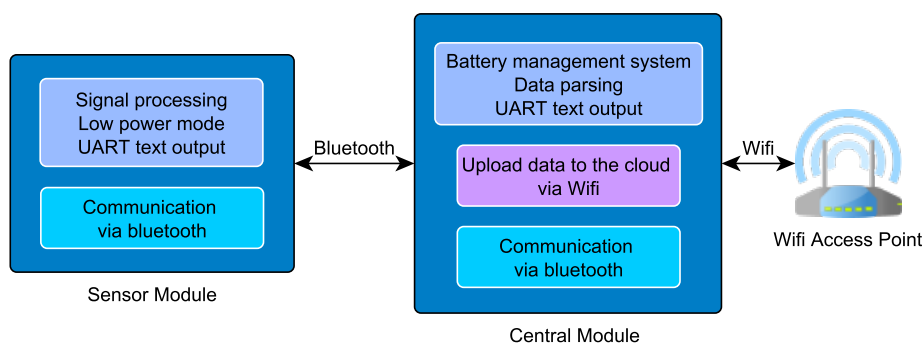
Nakonec je z grafu zřetelné, že 3D simulace přináší nejpřesnější výsledek blížící se realitě v porovnání s 2D simulací. Pomocí výsledné geometrie simulačního 3D modelu byla vytvořena finální anténa u sensorového a centrálního modulu pro bluetooth spojení.

Kapitola 4

SW řešení

V této kapitole je stručně popsána softwarová stránka sensorového a centrálního modulu, běžné funkce pro práci s perifériemi nebudou popsány, stejně jako BLE knihovna výrobce čipu.

Nejdříve je rozebrána struktura bezdrátové komunikace, která z větší části vyplývá již z dříve uvedené koncepce systému. Tato komunikace se skládá ze dvou částí. Prvně jsou pomocí bluetooth ze sensorových modulů odeslány naměřené hodnoty do centrální jednotky, kde se data zdrží jenom chvíli, protože jsou obratem odeslány do cloudové služby skrze wifi.

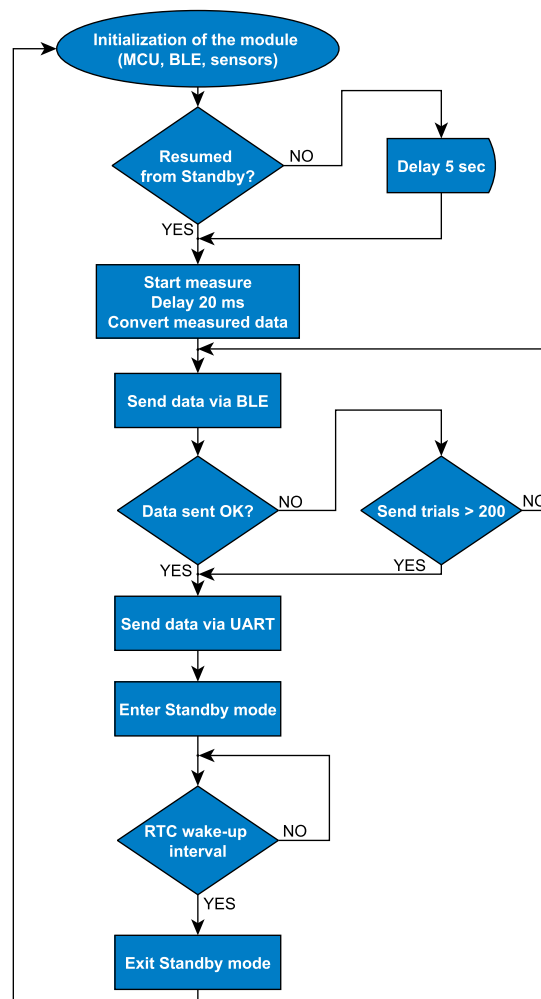


Obrázek 4.1: Blokové schéma softwarového řešení

Po odeslání naměřených veličin, jak sensorový modul tak i centrální, odešlou tyto hodnoty ještě na sériový výstup (UART). Oba dva programy byly napsány ve vývojovém prostředí SW4STM32 (System Workbench for STM32 neboli AC6). Jako základ byl použit kód pro komunikaci vývojového BLE modulu [11], který byl upraven pro přenos měřených dat a doplněn o části kódů, které jsou blokově vyobrazeny na obr. 4.1 a budou více rozebrány v následujícím textu o jednotlivých modulech.

4.1 Senzorový modul

Vývojový diagram programu senzorového modulu je na obr. 4.2. Po zapnutí napájení a nebo probuzení ze standby módu dojde nejprve k inicializaci použitých periferií – primárně to jsou ADC, BlueNRG, digitální senzory a UART. Následuje větvení, zdali jde o prvotní zapnutí a nebo o probuzení ze standby módu. Pokud jde o prvotní zapnutí, nastane čekací smyčka o délce 5 sekund. Tato smyčka je z důvodu připojení programátoru, protože ve standby módu, který je po většinu času, se nelze k MCU připojit. Jinak program pokračuje v 20ms periodě měření environmentálních veličin.



Obrázek 4.2: Hlavní program senzorového modulu

Během této měřicí periody ADC provede 800 měření na jeden analogový kanál, kde výsledná hodnota je vypočítána jako aritmetický průměr. Analogové kanály jsou celkem tři (intenzita osvětlení, hladina hluku, napětí baterie). Jako reference pro AD převod slouží napájecí napětí (tedy napětí CR2032

baterie). Aby měření veličin nekolísalo s postupným vybíjením baterie, je napětí baterie periodicky porovnáváno s napětím vnitřní bandgap reference, jejíž přesná hodnota změřená výrobcem je napevno uložena v paměti procesoru. Pomocí tohoto principu se změří reálné napájecí napětí, které se potom použije ve výpočtech pro ostatní analogové veličiny. Nepřesnost měření analogových veličin vlivem vybíjení je tedy kompenzována.

V napsaném kódu jsou implementovány funkce pro převod napětí na žádané jednotky (lx, dB, V) včetně kalibračních konstant, které jsou ručně zadány pro každý měřicí modul.

Po navázání BLE spojení s centrální jednotkou dojde k přenosu naměřených dat. Pokud nedojde k úspěšnému spojení, například z důvodu zarušení prostředí, pokus se opakuje. Aby se pokus o spojení neopakoval do značného vybití baterie, je počet pokusů omezen (aktuálně na 200). Tato hodnota se ukázala jako vyhovující během praktických testů.

Jakmile je bezdrátový přenos dat dokončen, následuje odeslání textového řetězce přes UART. Jak vypadá takový výstup je zachyceno na níže uvedeném sériovém terminálu.

```

SM terminal
File Port Rx Tx Help
Disconnect Clear Send EOF Send EOL Send Tab Send string Send integer Send file From keyboard
Text HEX Info
25.6:10.0:197:43:3.042
25.6:10.0:197:43:3.042
25.6:10.0:197:43:3.042
25.6:10.0:196:43:3.044
25.6:10.0:196:43:3.044
HWver 49, FWver 1813
CLIENT: BLE Stack Initialized
Client Create Connection
Connected to device:02-80-E1-00-00-AA
Start reading TX Char Handle
EVT_BLUE_GATT_DISC_READ_CHAR_BY_UUID_RESP
TX Char Handle 0011
Start reading RX Char Handle
EVT_BLUE_GATT_DISC_READ_CHAR_BY_UUID_RESP
RX Char Handle 0014
25.6:10.0:197:43:3.042
25.6:10.0:196:43:3.044
25.6:10.0:195:43:3.042
25.6:10.0:195:43:3.042
25.6:10.0:194:43:3.044
25.6:10.0:195:43:3.044
25.6:10.0:195:43:3.042
25.6:10.0:194:43:3.042
25.6:10.0:194:43:3.042
25.6:10.0:194:43:3.042
25.6:10.0:194:43:3.044
connected Rx: 643B (0.000 kB/s) FIFO rx: 0B tx: 0B

```

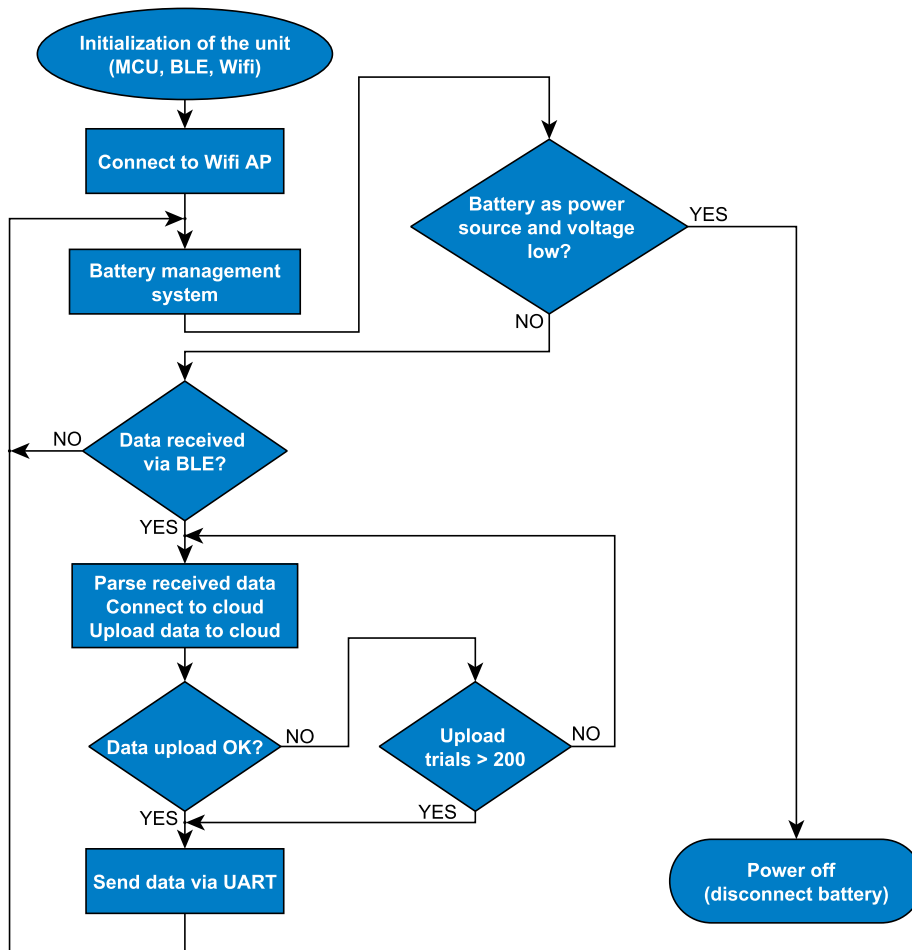
Obrázek 4.3: UART výpis sensorového modulu

Tímto aktivní cyklus sensorového modulu končí a modul přechází do standby režimu s RTC intervalou probouzeční funkcí, která je nastavena na 15 minut, ale lze ji v programu změnit. Nakonec se po uplynutí nastaveného intervalu modul probudí a celý cyklus se opakuje.

Pro rychlejší běh programu jsou všechny obsluhy periférií psány v DMA režimu.

4.2 Centrální modul

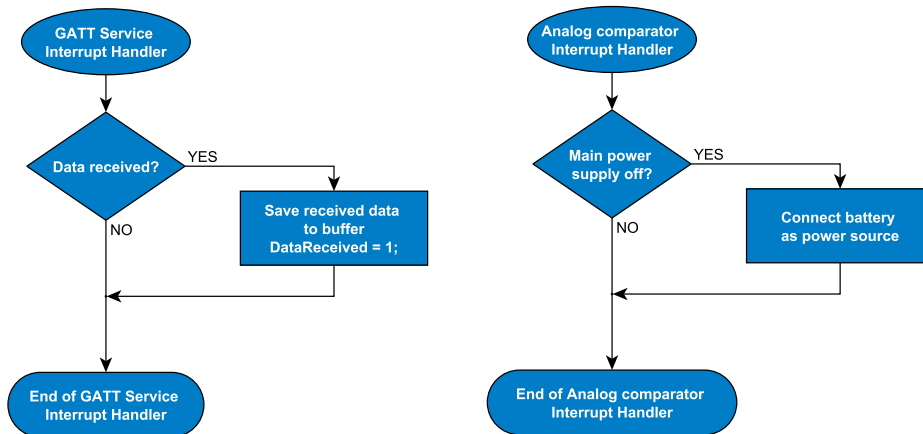
Centrální modul má v porovnání se sensorovým modulem více programových funkcí. Kromě bluetooth komunikace má na starosti také wifi komunikaci a správu zálohovacího akumulátoru. Vývojový diagram programu je podobný sensorovému modulu, proto zde bude vysvětlena pouze wifi a BMS část.



Obrázek 4.4: Hlavní program centrální jednotky

Kód pro správu napájení se stará o dobrou kondici zálohovacího akumulátoru a udržuje jej vždy nabitý na 4,2 V. V případě napájení z akumulátoru kontroluje jeho napětí, aby nedošlo k nenávratnému poškození akumulátoru z důvodu vybití pod bezpečnou mez (3V). Pokud napětí klesne nebezpečně nízko, centrální jednotka odpojí akumulátor, aby nedocházelo k dalšímu vybíjení. Jednotka se tedy vypne a opětovné zapnutí nastane až při obnovení hlavního napájení.

Program centrální jednotky obsahuje mimo jiné dvě velmi důležité služby přerušeni, viz obr. 4.5. První obsluha přerušeni se stará o načtení dat z bluetooth čipu do bufferu. Zároveň se nastaví příznak `DataReceived`, podle kterého se potom v hlavní smyčce pozná, že přišla data ze sensorového modulu a pokračují dále na zpracování. Druhá obsluha přerušeni se týká analogového komparátoru. Tento komparátor je nastaven tak, aby vyvolal přerušeni při poklesu napájecího napětí, tzn. že obslužný kód přerušeni rychle přepne napájení na záložní zdroj (akumulátor).



Obrázek 4.5: Vybrané důležité služby přerušeni centrální jednotky

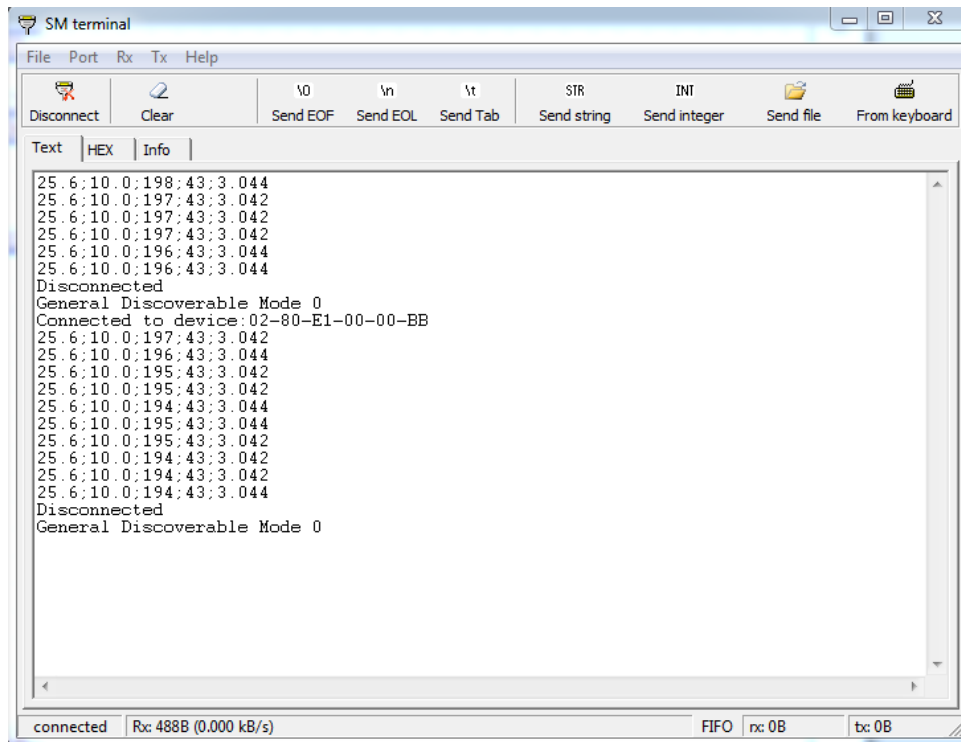
Komunikace s wifi modulem ESP8266 probíhá výhradně přes textové AT příkazy. Textové příkazy mají tu nevýhodu, že se na embedded zařízení velmi špatně parsují, obzvláště typ AT. Pro komunikaci s wifi modulem byla napsána jednoduchá knihovna, která umožňuje připojení modulu k wifi přístupovému modu, spojit se s webovou službou a zaslat jí příkazy typu GET nebo PUT. Níže je použití jedné funkce pro upload jednoho testovacího vzorku (pouze data o teplotě 20,7 °C a relativní vlhkosti 66,8 %) do cloudu GroveStreams.

```

1 ESP8266_SendData("PUT /api/feed?api_key=API_KEY&compId=bath&
2 data=20.7&data=66.8
3 HTTP/1.1\nHost: grovestreams.com\n
4 Connection: close\n
5 Content-Type: application/json\n\n");
  
```

Velmi důležitá je správnost textové syntaxe odeslaného řetězce. Příkaz PUT musí končit dvěma znaky pro nový řádek, jinak se na straně serveru neprovede.

Stejně jako senzorový modul tak i centrální jednotka poskytuje textový výstup přijatých dat ze senzorů na sériovém portu.



```
SM terminal
File Port Rx Tx Help
Disconnect Clear \0 \n \t STR INT Send EOF Send EOL Send Tab Send string Send integer Send file From keyboard
Text HEX Info
25.6;10.0;198;43;3.044
25.6;10.0;197;43;3.042
25.6;10.0;197;43;3.042
25.6;10.0;197;43;3.042
25.6;10.0;196;43;3.044
25.6;10.0;196;43;3.044
Disconnected
General Discoverable Mode 0
Connected to device:02-80-E1-00-00-BB
25.6;10.0;197;43;3.042
25.6;10.0;196;43;3.044
25.6;10.0;195;43;3.042
25.6;10.0;195;43;3.042
25.6;10.0;194;43;3.044
25.6;10.0;195;43;3.044
25.6;10.0;195;43;3.042
25.6;10.0;194;43;3.042
25.6;10.0;194;43;3.042
25.6;10.0;194;43;3.044
25.6;10.0;194;43;3.042
25.6;10.0;194;43;3.044
Disconnected
General Discoverable Mode 0
connected Rx: 488B (0.000 kB/s) FIFO rx: 0B tx: 0B
```

Obrázek 4.6: UART výpis centrálního modulu

Trochu problematické se jeví ovladače pro BlueNRG čip, protože existují pouze v podobě HAL vrstvy. Neexistuje žádný low level driver. HAL vrstva je náročná na paměť (objektové konstrukce, neustálé volání ukazatelů) a de facto nevhodná pro jednoduché a spolehlivé embedded aplikace (problém s orientací v programu, ladění kódu třetích stran). Vytvořený program, pro senzorový i centrální modul, zabírá přibližně 53 kB programové paměti. Největší část výsledného binárního souboru okupuje samotná HAL vrstva s ovladačem pro bluetooth čip – cca 42 kB. V případě použití jiného MCU pro tento či obdobný projekt je třeba počítat s FLASH pamětí o minimální velikosti 64 kB.

Kapitola 5

Výsledky

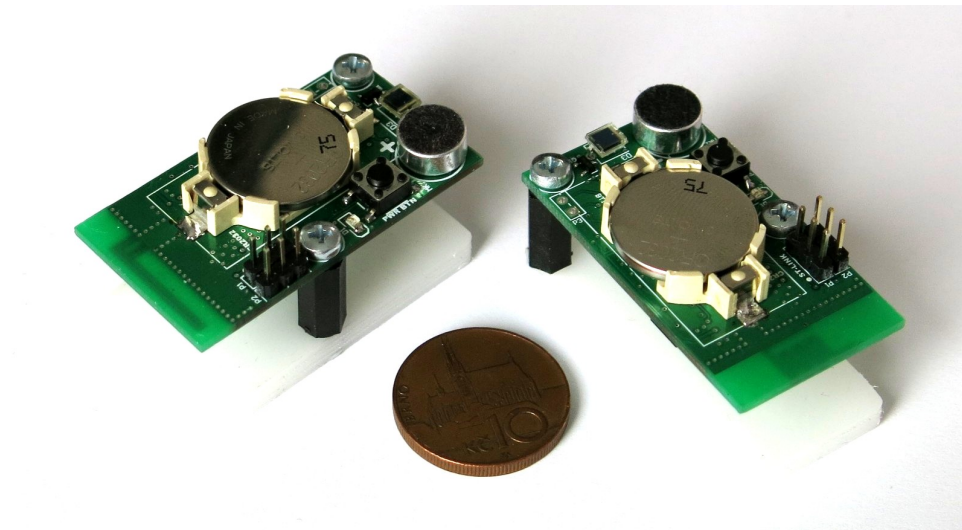
Tato kapitola se krátce věnuje prezentaci vytvořených modulů do senzorové sítě a měření jejich vybraných klíčových parametrů.

5.1 Realizované moduly senzorové sítě

Zálohovací akumulátor centrální jednotky je umístěn v bateriovém držáku pro snadnější manipulaci při experimentech.



Obrázek 5.1: Osazená a oživená centrální jednotka na podstavci



Obrázek 5.2: Finální senzorové moduly na podstavcích

■ 5.2 Měření parametrů realizovaných modulů

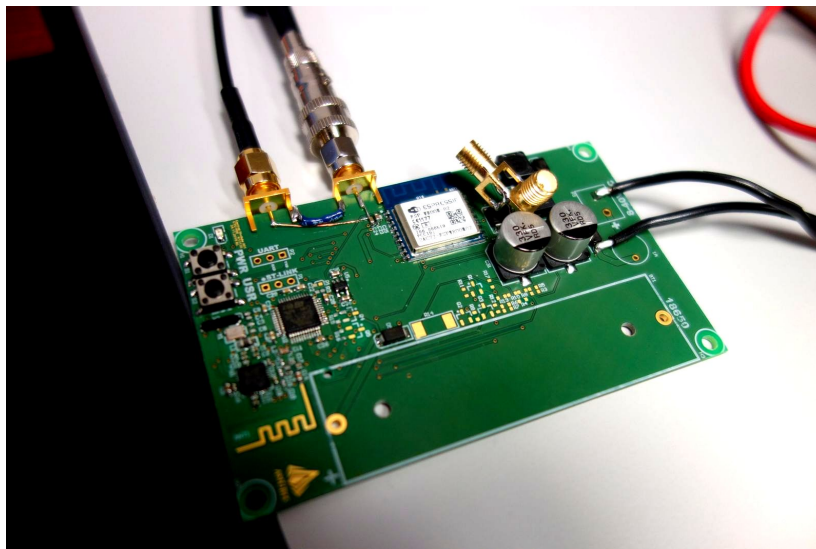
■ 5.2.1 Charakteristika napájecích zdrojů

Centrální jednotka má poměrně značný pulzní odběr při vysílání wifi modulem ESP8266, proto je vhodné mít dobře navržený napájecí zdroj, resp. jeho stabilitu ve zpětné vazbě a výstupní impedanci (tohle se týká i návrhu PCB pro vedení napájecích cest). Pro usnadnění práce existuje poměrně šikovný přístroj, Bode 100 [24], což je vlastně vektorový analyzátor do 40/100 MHz, který má ovšem obslužný software a dodatečný modulový hardware přizpůsoben pro měření vlastností jako je frekvenční odezva, impedance, zesílení/fáze apod.



Obrázek 5.3: Měřicí přístroj Bode 100 od Omicron Lab

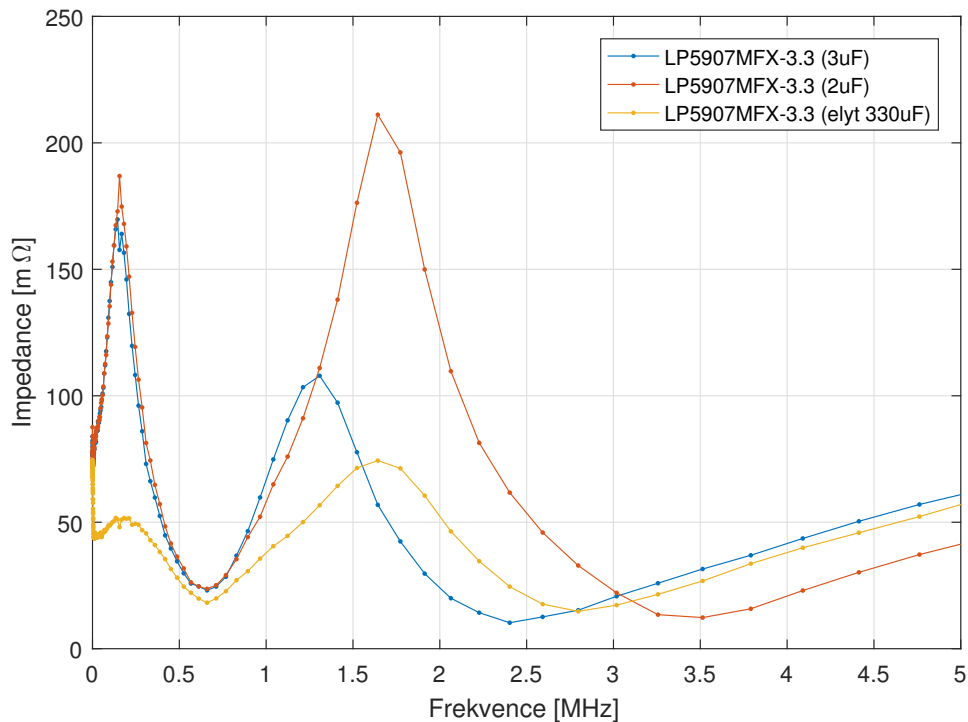
Pro měření impedance napájecích zdrojů se využívá externího výkonového modulu, který je schopen zatěžovat napájecí větve pulzními proudy o dané frekvenci. Pro „chod naprázdno“ zdroje obsahuje také bias obvod, který trvale zatěžuje měřený obvod stejnosměrným proudem o velikosti 10 mA.



Obrázek 5.4: Připojení LDO stabilizátoru pomocí dvou SMA konektorů

Pro praktické měření je potřeba napojit dvě sondy (jedna napěťová měřicí, druhá injektující zátěžový proud) co nejbližší k danému zdroji, resp. místu odběru proudu. V tomto případě bylo provedeno dvojí měření, jedno pro samotný spínaný zdroj a druhé pro LDO stabilizátor v místě napájení wifi modulu, protože ten bude vytvářet pulzní odběr.

Bohužel připojení konektorů nebylo možné realizovat kratší cestou, nežli je vidět na obr. 5.4. Indukčnost přívodních vodičů se však uplatňuje až při vyšších frekvencích (řádově MHz), kde ovšem impedance již není tak důležitá (v tomto případě pro vysílací bursty). Samotné měření (po kalibraci sond impedančními normály) probíhá velmi rychle a to v rozsahu od 100 Hz do 40 MHz. Výstupem jsou hodnoty impedance závislé na frekvenci, lze také zobrazit reálnou a imaginární složku.

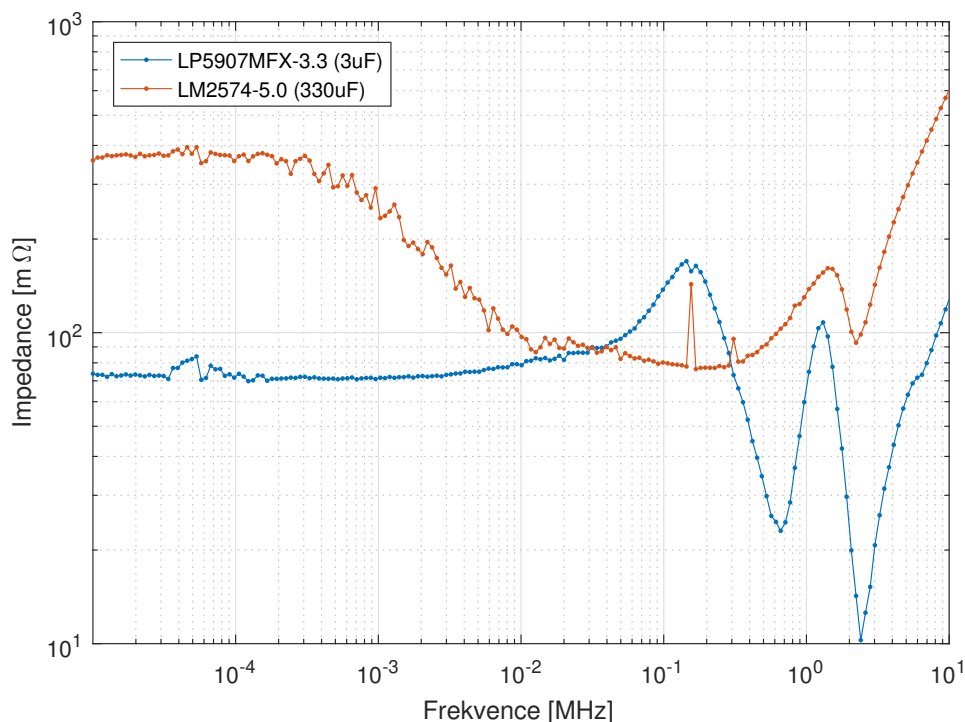


Obrázek 5.5: Impedance LDO do 5 MHz

Měření bylo provedeno pro různé hodnoty výstupní kapacity stabilizátoru. Nejdříve proběhlo měření desky bez úprav, poté následovalo přidání $1\mu\text{F}$ keramického kondenzátoru a nakonec $330\mu\text{F}$ elektrolytického SMD kondenzátoru.

Z průběhů impedance na obr. 5.5 lze krásně vidět, kdy již blokovací kondenzátory začínají rezonovat (impedance stoupá) a kdy je jejich rezonance naopak utlumena jiným kondenzátorem (viz modrý průběh, který je kolem 1,25 MHz utlumen přidanou kapacitou). Zdaleka nejlepší se jeví přidání elektrolytického kondenzátoru, který průběh impedance elegantně vyhlazuje (tlumí rezonance keramických kondenzátorů s nízkým ESR). V rychlejších aplikacích je tedy většinou nízké ESR keramických kondenzátorů na škodu, protože se snadno mohou dostat do nežádoucí rezonance s jiným prvkem. Ve správném návrhu se proto často zapojují do série s rezistorem. V tomto případě je ovšem impedance LDO stabilizátoru dostačující i bez elektrolytického kondenzátoru – zdroj si vystačí s přidaným keramickým kondenzátorem.

Frekvenční závislost impedance u spínaného zdroje není již tak kritická, neboť je z něj napájeno pouze dobíjení zálohovacího akumulátoru. Byla by však škoda zdroj neproměřit také. Pro zajištění správného impedančního přizpůsobení jsou konektory napájeny přímo na kontakty výstupního filtračního elektrolytického kondenzátoru. Výsledné měření je na obr. 5.6 s logaritmickým měřítkem pro přehlednost.

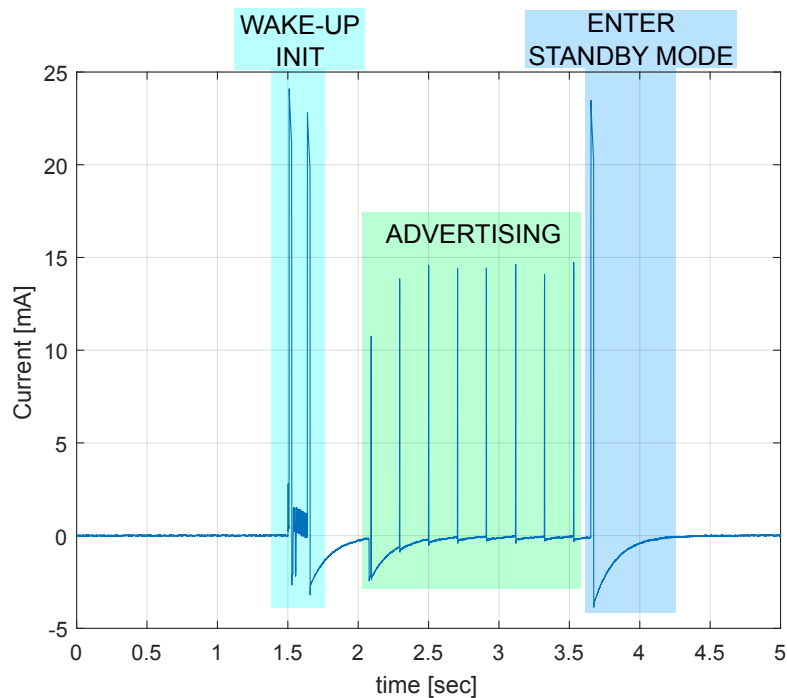


Obrázek 5.6: Impedance LDO a spínaného zdroje do 10 MHz

Na obr. 5.6 je detail impedancí obou zdrojů pro porovnání. Z průběhů lze vyčíst, že spínaný zdroj má mnohonásobně horší parametry při nižších frekvencích, kdy se ještě neuplatňuje impedance $330\mu\text{F}$ kondenzátoru, ta se začíná zapojovat až přibližně od frekvence 1 kHz (impedance klesá). Z grafu jsou dále zajímavé špičky kolem frekvence 150 kHz u červené křivky. Jedná se o chybu měření v důsledku frekvenčního průniku vzorkovací frekvence do násobku spínací frekvence zdroje (≈ 52 kHz). Na vyšších kmitočtech mají obě křivky lehce podobný charakter – to je způsobeno použitím podobných keramických kondenzátorů na výstupní větvi (spínaný zdroj má výkyvy menší, protože je tlumí elektrolytický kondenzátor).

5.2.2 Odběr sensorového modulu

Proudový odběr sensorového modulu napájeného z baterie byl změřen ve dvou etapách. První etapa spočívala v měření špiček během vysílání a práce MCU. Toto měření bylo provedeno osciloskopem s proudovým bočníkem, který byl vytvořen z rezistoru o hodnotě 10 ohmů. Druhá část (klidový odběr ve standby režimu) byla změřena přesným, kalibrovaným, multimetrem.



Obrázek 5.7: Průběh proudu při aktivním cyklu

Z proudového průběhu jdou poznat jednotlivé etapy vykonávání programu. Po integraci průběhu v čase lze získat průměrnou spotřebu, která je v následující tabulce:

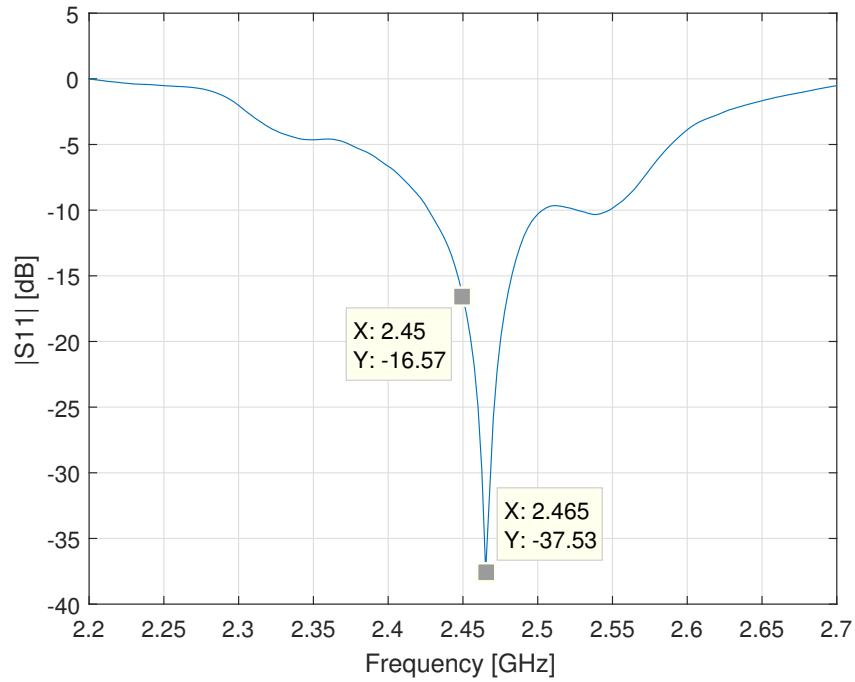
Parametr	$I_{AVG_{TX}}$	$I_{AVG_{MCU}}$	$I_{AVG_{stdby}}$	$I_{AVG_{total}}$
I [μA]	276	588	1,04	1,71

Tabulka 5.1: Rozdělení jednotlivých proudových odběrů

V posledním sloupci je přepočtená celková průměrná hodnota proudového odběru z baterie. Pokud by se do změřeného odběru započítalo i samovybitení a stárnutí baterie, dosáhlo by se výsledku blížkém v navrhnutém výpočetním řešení. Ve skutečnosti výpočetní řešení má poměrně přísné podmínky a výsledná doba života baterie vychází menší než opravdu je.

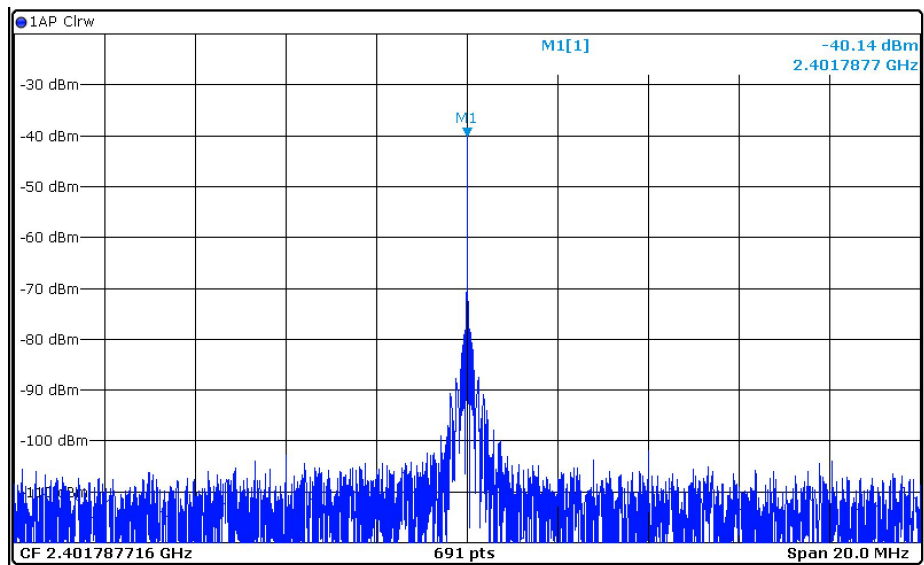
5.2.3 Vlastnosti antény

Na vektorovém analyzátoru byl změřen S11 parametr výsledné antény na senzorovém modulu, který byl osazen všemi součástkami kromě přizpůsobovacího členu. Na přípojku antény u balunu byl napájen tenký koaxiální kabel, tedy stejný princip jako na obr. 3.27 v sekci 3.4.

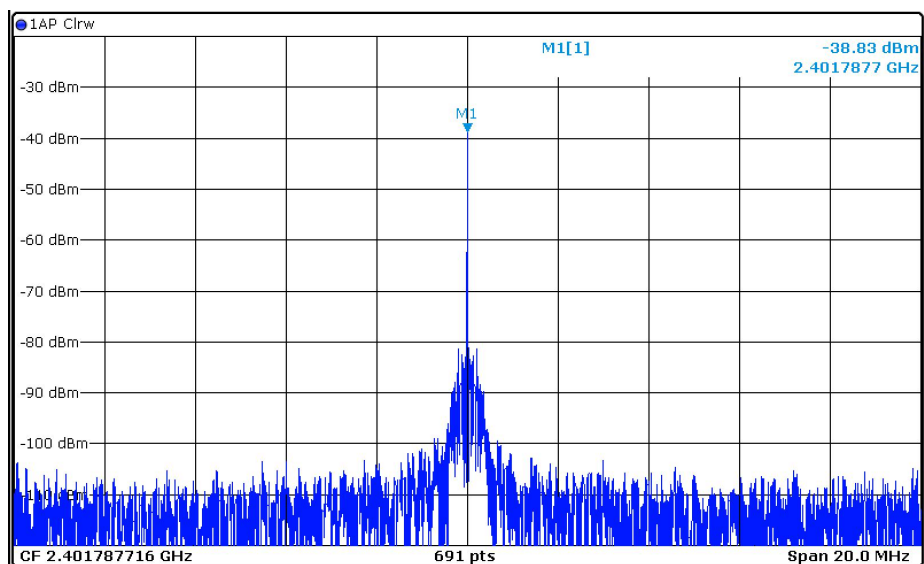


Obrázek 5.8: S11 parametr antény verze 002r5 na senzorovém modulu

Pro porovnávací měření opravdového vyzařovaného signálu do prostoru se využilo spektrálního analyzátoru s anténou umístěnou v EMC komoře. V komoře byl nejdříve změřen vývojový BLE kit při zapnuté nosné frekvenci a pak za stejných podmínek senzorový modul.



Obrázek 5.9: Spektrum vývojového BLE kitu

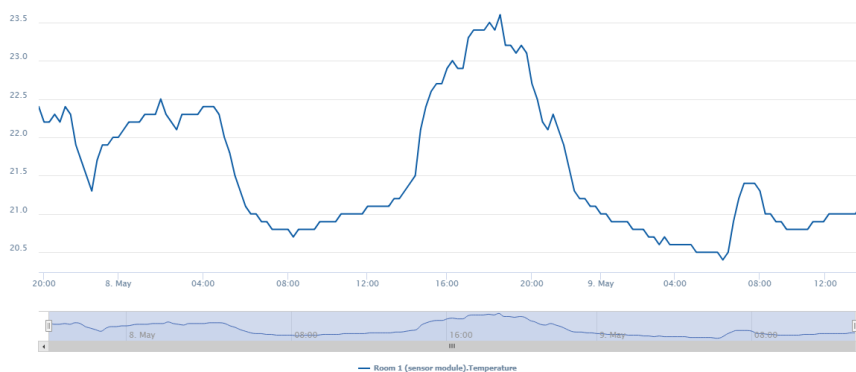


Obrázek 5.10: Spektrum sensorového modulu

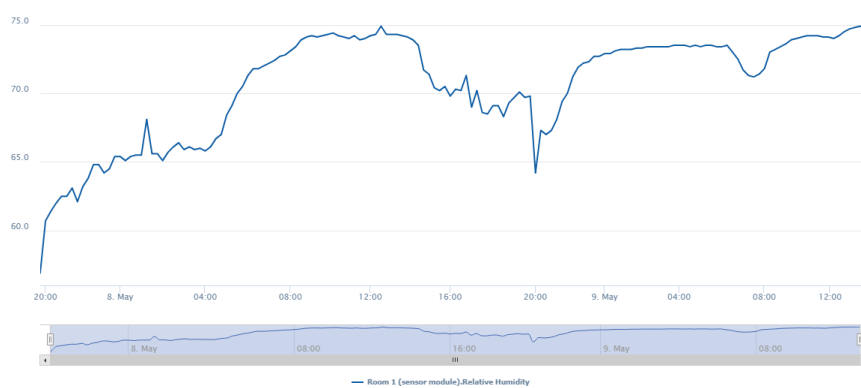
Z naměřeného spektra, respektive amplitudy nosné frekvence je vidět, že anténa na sensorovém modulu je navržena stejně dobře jako na vývojovém kitu.

5.3 Ukázka použití na GroveStreams

Níže jsou zobrazeny záznamy z cloudové vizualizace pro naměřenou teplotu, relativní vlhkost a intenzitu osvětlení v obytné místnosti.



Obrázek 5.11: Průběh teploty v místnosti



Obrázek 5.12: Průběh relativní vlhkosti v místnosti



Obrázek 5.13: Průběh intenzity osvětlení v místnosti

Kapitola 6

Závěr

V této práci je popsán vývoj bezdrátové sensorové sítě pro použití v inteligentních budovách. Základní systém se skládá z jedné centrální jednotky a několika sensorových modulů, které jsou k ní bezdrátově pomocí technologie bluetooth připojeny. Sensorové moduly periodicky odesílají naměřené environmentální veličiny do centrální jednotky, která je pak přeposílá do cloudové služby. U sensorových modulů byla splněna nejenom podmínka nízké energetické náročnosti, ale také malých rozměrů a možnosti rozšíření o dodatečné vstupy – modul obsahuje volitelně dva analogové vstupy pro ADC a sériový port pro další komunikaci. Vytvořený výpočetní model pro výdrž baterie byl ověřen měřením reálné spotřeby. Součástí konstrukce systému byl i vývoj nízkonákladové antény na plošném spoji v pásmu 2,45 GHz. Design antény spočíval v poměrně dlouhém iterativním procesu plného simulací a experimentů.

Centrální jednotka má dobře navržené napájecí zdroje, zejména pro velké proudové výkyvy při wifi spojení. Stabilita těchto zdrojů byla změřena a zdroje byly doladěny kondenzátory na výstupu. Řídicí firmware centrální jednotky úspěšně plní i funkci battery management systému pro Li-Ion akumulátor a udržuje jej ve zdravé kondici. Spojení s wifi je stabilní, bluetooth občas kolísá a spojení se uskuteční až na několikátý pokus. Sensorová síť defaultně umožňuje upload dat do cloudu GroveStreams, ale jednoduchou změnou adresy v programu MCU centrální jednotky lze uploadovat i na jiné servery, např. ThingSpeak nebo Dweet.io. Vytvořený systém je tedy z části univerzální a modifikací softwaru umožňuje další rozšíření použití.

6.1 Návrhy na budoucí vylepšení

Software, převážně centrální jednotky, by se dal dále vylepšit - např. synchronizací s časovým (NTP) serverem, protože nastavená perioda bude časem driftovat. Případně by šlo využít přesnější RTC u BlueNRG čipu, které je taktováno krystalovým oscilátorem. Jelikož použitý MCU má velké rezervy v operační paměti, bylo by možné naprogramovat funkci pro sběr dat při výpadku napájení/spojení s cloudem. Po opětovném vytvoření wifi spojení by se data z RAM paměti odeslala na server i s časovými značkami známými od poslední synchronizace. V poslední řadě by bylo možné provést upgrade použitého BlueNRG-MS za BlueNRG-1 [9] a zbavit se tak externího MCU.

Příloha A

Seznam zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Význam
IoT	Internet of Things
BMS	Battery Management System
ADC	Analog to Digital Converter
MCU	MicroController Unit
Eduroam	Education Roaming
BLE	Bluetooth Low Energy
API	Application Programming Interface
ACI	Application Command Interface
GATT	Generic Attributes Profile
HTTP	HyperText Transport Protocol
GET	HTTP metoda přenosu dat
DIY	Do It Yourself
PCB	Printed Circuit Board
WAN	Wide Area Network
LUA	jednoduchý skriptovací jazyk
MEMS	MicroElectroMechanical System
balun	balanced-unbalanced, symetrizační člen
S11	return loss, odražený výkon
FEM	Finite Element Method, metoda konečných prvků



Příloha B

Literatura

- [1] J. Ganssle. *The Art of Designing Embedded Systems*, Elsevier Science, 2008. ISBN 978-0-7506-8644-0
- [2] *MARKET PULSE REPORT, INTERNET OF THINGS (IoT), April 2017* [online]. Growth Enabler, 21.5.2018.
<https://growthenabler.com/flipbook/pdf/IOT%20Report.pdf>
- [3] *SMART HOMES* [online]. Qorvo, 21.5.2018.
<http://www.qorvo.com/applications/internet-of-things/smart-home>
- [4] *Zigbee Alliance* [online]. Qorvo, 21.5.2018.
<http://www.zigbee.org/>
- [5] *NodeMCU* [online]. Qorvo, 21.5.2018.
http://nodemcu.com/index_en.html
- [6] *Arduino Uno WiFi vs. NodeMCU* [online]. Arduino CZ, 21.5.2018.
<https://arduino.cz/arduino-uno-wifi-vs-nodemcu/>
- [7] *Blynk app* [online]. Blynk, 21.5.2018.
<http://www.blynk.cc/>
- [8] *X-CUBE-BLE1* [online]. STMicroelectronics, 21.5.2018.
<http://www.st.com/web/en/catalog/tools/PF261442>
- [9] *BlueNRG-1* [online]. STMicroelectronics, 21.5.2018.
<http://www.st.com/en/wireless-connectivity/bluenrg-1.html>
- [10] *BlueNRG* [online]. STMicroelectronics, 21.5.2018.
http://www.st.com/content/st_com/en/products/wireless-connectivity/bluetooth-bluetooth-low-energy/bluenrg-ms.html
- [11] *BlueNRG sample code* [online]. STMicroelectronics, 21.5.2018.
<http://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-ble1.html>

- [12] *BALF-NRG-01D3* [online]. STMicroelectronics, 21.5.2018.
http://www.st.com/content/st_com/en/products/emi-filtering-and-signal-conditioning/ipd-for-rf-front-end/baluns/balf-nrg-01d3.html?icmp=pf260790_pron_nb_sep2014&sc=balf-nrg-nb
- [13] *STM32L071CBT6* [online]. STMicroelectronics, 21.5.2018.
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/b5/24/80/11/51/59/47/f7/DM00141136.pdf/files/DM00141136.pdf/jcr:content/translations/en.DM00141136.pdf>
- [14] *Si7006* [online]. Silicon Labs, 21.5.2018.
<https://www.silabs.com/Support%20Documents%2FTechnicalDocs%2FSi7006-A20.pdf>
- [15] *BPW34* [online]. Vishay, 21.5.2018.
<http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>
- [16] *ABM-707-RC* [online]. Pro-Signal, 21.5.2018.
<http://www.farnell.com/cad/460032.pdf>
- [17] *LP5907* [online]. Texas Instruments, 21.5.2018.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp5907.pdf>
- [18] *MCP6242* [online]. Microchip Technology Inc., 21.5.2018.
https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/labs/f2015/lab4_MCP6241_opamp.pdf
- [19] *CR2032 pulse drain* [online]. Nordic Semiconductor, 21.5.2018.
<https://www.dmcinfo.com/Portals/0/Blog%20Files/High%20pulse%20drain%20impact%20on%20CR2032%20coin%20cell%20battery%20capacity.pdf>
- [20] *Electret Microphone Pre-Amplifier Reference Design* [online]. Texas Instruments, 21.5.2018.
<http://www.ti.com/lit/ug/tidu765/tidu765.pdf>
- [21] *Small Size 2.4 GHz PCB antenna* [online]. Texas Instruments, 21.5.2018.
<http://www.ti.com/lit/an/swra117d/swra117d.pdf>
- [22] *2450AT18B100E* [online]. Johanson Technology, 21.5.2018.
<http://www.johansontechnology.com/datasheets/antennas/2450AT18B100.pdf>
- [23] *ESP8266* [online]. Espressif Systems, 21.5.2018.
https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2471/0A-ESP8266__Datasheet__EN_v4.3.pdf
- [24] *Bode 100* [online]. Omicron Lab, 21.5.2018.
<https://www.omicron-lab.com/bode-100/product-description.html>

