


Senzorické zařízení s připojením do sítě IoT

Tomáš Tuska

Bakalářská práce
2018

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Tuska**
Osobní číslo: **A15077**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Senzorické zařízení s připojením do sítě IoT**
Téma anglicky: **A Sensor Device with an IoT Network Connection**

Zásady pro vypracování:

1. **Prostudujte aktuální stav komunikačních technologií pro Internet věcí (IoT - Internet of Things).**
2. **Vyberte komunikační technologii, která má v našem kraji dostatečné pokrytí.**
3. **Vyberte vhodné senzory nebo obvodové moduly pro měření náklonu, zrychlení a zeměpisné polohy.**
4. **Navrhněte schéma zapojení zařízení, které bude využívat výše uvedené senzory a naměřené hodnoty zasílat na server prostřednictvím sítě IoT.**
5. **Realizujte takové zařízení na plošném spoji a otestujte jeho funkci.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **MARTIN, Robert C.** Čistý kód: [návrhové vzory, refaktorování, testování a další techniky agilního programování]. Brno: Computer Press, 2009. ISBN 978-80-251-2285-3.
2. **HEROUT, Pavel.** Učebnice jazyka C. Praha: [Středisko pro podporu studentů se specifickými potřebami ELSA ČVUT], 2015. ISBN 978-80-7232-383-8.
3. **HEROUT, Pavel.** Učebnice jazyka C. 4. vyd. České Budějovice: Kopp, 2008. ISBN 978-80-7232-367-8.
4. **AN3308 Application note: LIS3DH: MEMS digital output motion sensor ultra-low-power high-performance 3-axis "nano" accelerometer.** STMicroelectronics [online]. 2017 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/b5/24/80/11/51/59/4/>
5. **STM32L071x8 STM32L071xB STM32L071xZ: Access line ultra-low-power 32-bit MCU Arm?-based Cortex?-M0+, up to 192KB Flash, 20KB SRAM, 6KB EEPROM, ADC.** STMicroelectronics[online]. 2017 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/b5/24/80/11/51/59/4/>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Dulík, Ph.D.

Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání bakalářské práce:

15. prosince 2017

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2018

Ve Zlíně dne 15. prosince 2017



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

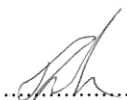
Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 22.5.2018


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Cieľom tejto bakalárskej práce je vytvoriť low-power zariadenie, schopné merať rôzne fyzikálne veličiny a následne tieto namerané veličiny posielat' cez vybratú komunikačnú technológiu, určenú primárne pre internet vecí.

Kľúčové slova: IoT, C, GNSS, low-power, FreeRTOS, SigFox

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to create low-power device, which is able to measure various physical quantities and subsequently send these quantities through the selected communication technology, designed primarily for Internet of Things.

Keywords: IoT, C, GNSS, low-power, FreeRTOS, SigFox

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 INTERNET VECÍ - IOT	10
1.1 IQRF.....	11
1.1.1 MiWi	12
1.1.2 NB-IoT	12
1.1.3 Wi-Fi HaLow	13
1.1.4 LoRaWAN	13
1.1.5 Sigfox	14
1.1.6 ZigBee	15
1.1.7 Z-Wave.....	16
2 SENZORY PRE APLIKÁCIE IOT	17
2.1 AKCELEROMETER.....	17
2.1.1 Základné rozdelenie	17
2.1.2 Princíp funkčnosti kapacitného MEMS akcelerometra.....	17
2.1.3 Štandardné komunikačné rozhrania MEMS akcelerometra.....	20
2.1.3.1 Čítanie hodnôt zrýchlenia	20
2.1.4 Výpočet náklonu zariadenia	20
2.2 GLOBÁLNY DRUŽICOVÝ POLOHOVÝ SYSTÉM.....	21
2.2.1 GNSS systémy	21
2.2.1.1 GPS	22
2.2.1.2 GLONASS	22
2.2.1.3 Galileo.....	22
2.2.1.4 BeiDou	22
2.2.2 Obecná architektúra GNSS	22
2.2.2.1 Kozmický segment	23
2.2.2.2 Riadiaci segment.....	23
2.2.2.3 Uživateľský segment	24
2.2.3 Satelitné družice GNSS.....	24
2.2.4 Satelitné signály GNSS	24
2.2.4.1 Signály vysielané družicami GPS.....	25
2.2.4.2 Signály vysielané družicami GLONASS.....	26
2.2.4.3 Signály vysielané systémom Galileo	27
2.2.5 Propagácia signálov GNSS	29
2.2.6 Určenie polohy	30
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
3 POŽIADAVKY NA ZARIADENIE	32
4 VÝBER SIETE, HARDVÉROVÝCH MODULOV A KOMPONENTOV	33

4.1	VÝBER IOT SIETE	33
4.2	MCU STM32L073CZTx	33
4.3	AKCELEROMETER LIS3DH	34
4.4	GNSS MODUL U-BLOX MAX-M8Q	35
4.5	RÁDIOVÝ MODUL WISSOL WSSFM10R1	35
4.6	BATÉRIA LS33600CNR.....	37
5	SCHÉMA DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV	38
6	NÁVRH DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV	40
6.1	DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV	40
6.1.1	Anténa SigFox modulu	42
7	SOFTVÉR ZARIADENIA	44
7.1	PROGRAMOVACÍ JAZYK C	44
7.2	FREERTOS	44
7.2.1	Statické vytvorenie tasku	45
7.2.2	Definovanie činnosti taskov	45
7.2.2.1	Task akcelerometra – acc_task	46
7.2.2.2	Task GNSS modulu – gps_task	46
7.2.2.3	Task rádiového modulu – radio_task.....	47
7.2.2.4	Task aplikácie – app_task	47
7.2.2.5	Ovládací task – control_task.....	47
7.2.2.6	Servisný task – servis_task	47
7.2.3	Interná komunikácia úloh.....	48
7.2.3.1	Ukážka internej komunikácie	48
7.2.4	Presmerovanie zdroja prerušenia do taskov	49
7.3	SOFTVÉROVÉ KNIŽNICE	50
7.3.1	Knižnice MCU STM32L0CZTx	50
7.3.2	Knižnice akcelerometra LIS3DH	50
7.3.3	Knižnice GNSS modulu u-blox MAX-M8Q	52
7.3.4	Knižnica rádiového modulu Wissol WSSFM10R1	55
8	TESTY, OVERENIE FUNKČNOSTI.....	56
8.1	TEST FUNKČNOSTI RÁDIA	56
8.1.1	Vyžarovacia charakteristika antény rádiového modulu	57
8.2	TEST MODULU GNSS	58
8.3	ODBER A ŽIVOTNOSŤ ZARIADENIA	59
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ	68
	SEZNAM TABULEK.....	69

ÚVOD

V dnešnej dobe sa čoraz viac dostávajú do popredia zariadenia s pripojením do internetu vecí. Vďaka zlepšeniu poskytovaných služieb a zväčšujúcej sa ploche pokrytia sietí, nachádzame stále nové prípady použitia týchto technológií. Dopyt po týchto zariadeniach je uspokojený bohatým sortimentom modulov s pripojením na IoT. Moduly sa integrujú do zariadení s poväčšine špecifickým účelom (napr. meranie teploty). Nevýhoda týchto zariadení je ich obmedzená programová flexibilita.

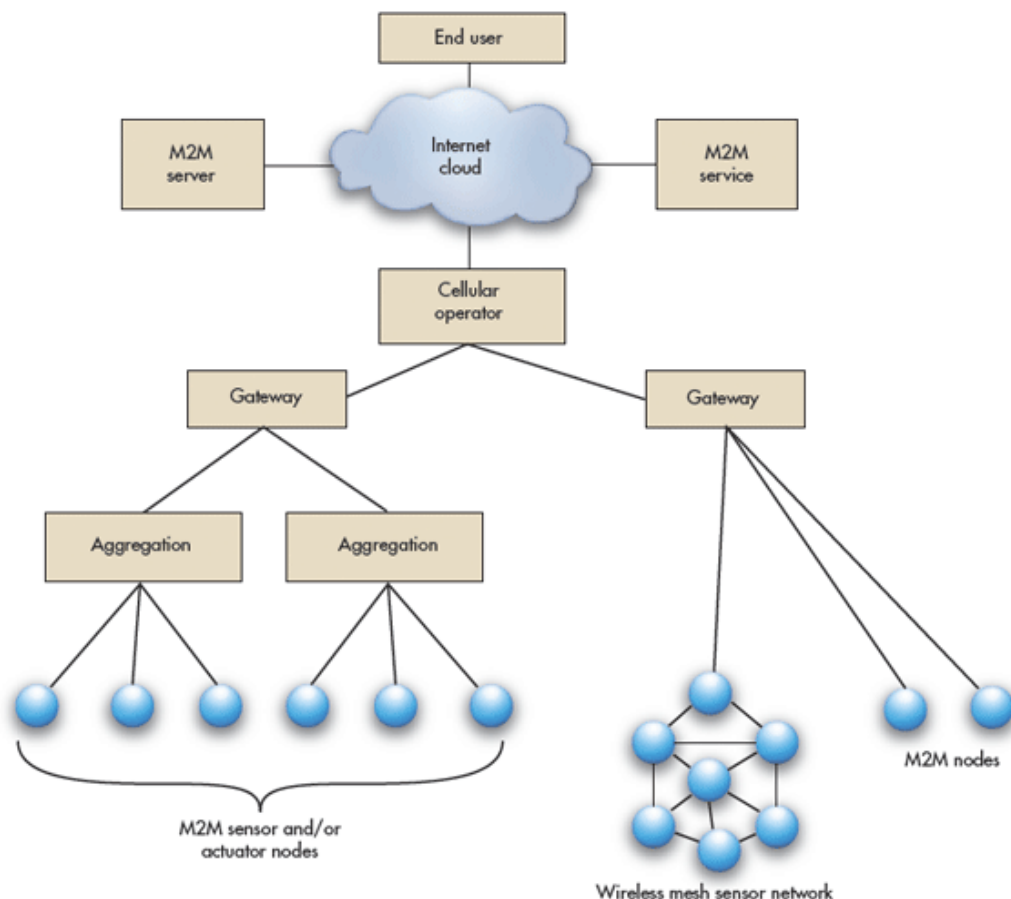
Naša práca sa venuje vytvoreniu vlastného, plne programovateľného low-power zariadenia, ktoré by malo byť schopné kvalitou konkurovať spomínaným zariadeniam. Zariadenie bude schopné merať viacero fyzikálnych veličín, ktoré následne spracuje a pošle pomocou siete SigFox. V teoretickej časti sa venujeme vysvetleniu pojmu IoT, technológiám IoT a problematike merania vybraných fyzikálnych veličín. V druhej časti bakalárskej práce navrhujeme schému a dosku plošných spojov funkčného vzorku, ktorý následne hardvérovo a softvérovo oživujeme a testujeme.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 INTERNET VECÍ - IOT

Internet vecí (Internet of Things, IoT) definujeme ako sieť malých, cenovo dostupných, nízko odberových elektronických zariadení, ktoré slúžia na zber a výmenu dát bez priamej účasti človeka. Každé zariadenie pôsobí v sieti ako samostatný uzol. Uzly komunikujú medzi sebou alebo s centrálnou stanicou, ktorá poskytuje bezpečný prístup do cloud-u, kde sú uložené dáta uzlov [1].

Na komunikáciu medzi uzlami a base stanicou nemusí byť nutne použitá práve internetová sieť. Tá nachádza uplatnenie na rozhraní base stanice a cloud-u. Dôvodom je vysoká spotreba implementácie potrebného protokolu a samotný účel siete, ktorý bol na rozdiel od potreby prenosu malých dát uzlov siete IoT, určený na veľký objem dát.



Obr. 1 Architektúra IoT siete [2].

Vzdialenosť medzi uzlami a base stanicou môže byť rádovo metre (domácnosť) až kilometre (samostatné zariadenia) v závislosti od použitej technológie.

V nasledujúcich podkapitolách si predstavíme viacero IoT technológií (siete/protokoly) spolu s ich základnými parametrami.

1.1 IQRF

IQRF je platforma českého výrobce, určená pre bezdrôtovú konektivitu s nízkou energetickou náročnosťou, rýchlosťou a malým objemom dát. Je to kompletný systém od jednej firmy vrátane hardvéru (vysielače, brány, smerovače, príslušenstvo a vývojové nástroje), softvéru, protokolov a služieb. Dosah komunikácie je v radách desiatok až stoviek metrov, v zriedkavých prípadoch, alebo v špeciálnych sieťach, až niekoľko kilometrov [3]. Využitie nachádza predovšetkým v sieťach IoT, najmä pre telemetriu, priemyslové riadenie a automatizáciu budov a miest (pouličné osvetlenia, parkoviská atď.). Prvky IQRF môžu byť použité s ľubovoľným elektronickým zariadením (nutná kompatibilita rozhrania). Typicky sa používa na diaľkové ovládanie, monitoring diaľkovo získaných dát alebo pripojenie viacerých zariadení k bezdrôtovej sieti [3].

Parametre [3]:

- RF pásmo: bezlicenčné ISM 868, 916 a 433 Mhz (celosvetovo)
- IQRF je založené na vysielateľoch so vstavaným operačným systémom a voliteľnou komunikačnou vrstvou DPA
- Plne otvorená užívateľská funkcia závisí výhradne na aplikačnom softvéri vo vnútri:
 - Použitie prípravného frameworku v rámci DPA
 - Pre množstvo aplikácií je požadovaná funkčnosť dosiahnutá bez akéhokoľvek programovania
 - U neobvyklých aplikácií je ďalšie rozšírenie alebo úpravy ľahko programovať (v jazyku C)
 - V zvláštnych prípadoch môže byť aplikačný softvér celkovo naprogramovaný užívateľom (v OS, v jazyku C bez DPA)
- IQRF je vhodný pre jednoduchú komunikáciu peer-to-peer, ale najvyššej robustnosti dosahuje v komplexných mesh sieťach
- Paketová komunikácia, max. 64 B na jeden paket
- Dosah RF: stovky metrov vo voľnom priestore a desiatky metrov v budovách na jeden skok, až 240 skokov na jeden paket
- Mimoriadne nízka spotreba energie:
 - sub- μ A v pohotovostnom režime,
 - režim príjmu maximálny odber 15 μ A
- RF bitová rýchlosť: cca 20 kb/s
- Bez infraštruktúry a poplatkov za licencie či nosič

1.1.1 MiWi

MiWi je protokol navrhnutý firmou Microchip technology na báze štandardu IEEE 802.15.4 pre bezdrôtové siete. Je určený pre malé prenosové rýchlosti a krátke vzdialenosti, predovšetkým na nízkorozpočtové siete s obmedzenou veľkosťou pamäte, ako je napríklad diaľkové riadenie a monitoring, automatizované odčítania, senzorové siete atď. Pôsobí hlavne na frekvencií 2,4 GHz a podporuje všetky sieťové konfigurácie (hviezdica, strom, mesh), dosah je 20-50m. Podrobnejšie sa MiWi delí na [4]:

- MiWi™ P2P – peer-to-peer hviezdicovú sieť
- MiWi PRO – mesh topológiu (až 8000 uzlov a 64 skokov)

Medzi prednosti MiWi patrí jednoduché vytváranie a nasadzovanie sietí, prenositeľnosť aplikácií naprieč rôznymi vysokofrekvenčnými vysielačmi a jednoduché škálovanie topológie. Všetky tieto prednosti platia iba pri použití čipov od firmy Microchip technology [4].

Veľkou výhodou oproti konkurencii (napr. ZigBee®) je nízka pamäťová náročnosť implementácie protokolu, zaberajúca typicky 64 KB pamäte kódu. Tento fakt umožňuje použiť mikrokontrolér s menšou pamäťou, teda aj s nižšou cenou [5].

1.1.2 NB-IoT

NarrowBand IoT je bezdrôtová úzkopásmová LPWA technológia, špeciálne vyvinutá pre internet vecí. Jej najväčšou výhodou je možnosť nasadenia v pásme GSM a LTE. NarrowBand IoT dodržiava štandardy 3GPP. Bude poskytovať zlepšené pokrytie vo vnútri budov, podporu veľkého počtu zariadení, koncové zariadenia za veľmi nízku cenu s malou spotrebou energie a optimalizovanú sieť [6].

Parametre NB-IoT [6]:

- Šírka pásma 200kHz
- Dosah 15km (164dB)
- Licencované pásmo 7-900MHz
- Prenosová rýchlosť 50kbps
- Downlink (OFDMA) a uplink (FDMA s GMSK moduláciou prípadne SC-FDMA)

Medzi podporovateľov NB-IoT sú firmy ako Alcatel-Lucent, AT&T, Deutsche Telekom, Ericsson, Huawei, Intel LG Electronics, Nokia Networks Panasonic, Qualcomm, Samsung, Telefonica, T-Mobile US, Verizon, Vodafone a ďalší. Predpokladá sa, že NarrowBand IoT

doplní v budúcnosti na trhu už zavedené technológie ako Sigfox a LoRaWAN, a rozšíri ponuku našich mobilných operátorov [6].

1.1.3 Wi-Fi HaLow

Wi-Fi HaLow je založená na technológii IEEE 802.11ah. Na rozdiel od bežných Wi-Fi sietí, pracujúcich na frekvenciách 2,4 a 5 GHz, je prevádzkovaná na frekvencii 900 Mhz, čo zaručí širšie pokrytie a menšiu náchylnosť na rušenie signálu z obvyklého pásma. Prenos dát neprebíha kontinuálne, ale v pravidelných dávkach, ktorých interval môžeme nastaviť. Nižší vysielací výkon a odlišné schéma tak dovoľujú chod na batériu. Wi-Fi HaLow má byť priamym konkurentom Bluetooth, iba s väčším dosahom. Bohužiaľ certifikácia produktov je naplánovaná najskôr na rok 2018 [7] [3].

1.1.4 LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) je ďalší low-power bezdrôtový sieťový protokol, navrhnutý pre lacnú a zabezpečenú obojsmernú komunikáciu v internete vecí. Využíva opäť pásmo do 1 GHz a rýchlosť prenosu je 0,3 až 50 kb/s. Komunikácia medzi koncovými prvkami a bránami je rozložená na rôzne frekvenčné pásma a prenosové rýchlosti. Voľba rýchlosti prenosu dát je kompromisom medzi komunikačným rozsahom a dĺžkou správy. Jednotlivé komunikačné prúdy s rôznymi prenosovými rýchlosťami spolu neinterferujú (vzhľadom k technológii rozprestretého spektra) a vytvára sadu „virtuálnych“ kanálov pre zvýšenie kapacity base stanice. Pre maximalizáciu životnosti batérie koncového zariadenia a celkovej kapacity siete, sieťový server LoRaWAN spravuje prenosovú rýchlosť a vysokofrekvenčný výstup pre každé koncové zariadenie individuálne, prostredníctvom systému adaptívnych rýchlosti prenosu dát (ADR) [8].

LoRaWAN rozlišuje niekoľko tried zariadení [8]:

- Trieda A – koncové zariadenia podporujú obojsmernú komunikáciu (každý uplink je nasledovaný dvoma oknami pre príjem dát)
- Trieda B – mimo „vynútený“ downlink triedy A, otvárajú zariadenia tejto triedy mimoriadne prijímacie okná v nastavenú dobu
- Trieda C – prijímacie okná sú otvorené takmer nepretržite a zatvárajú sa iba pri vysielaní

Parametre [8]:

- Technológia: Spread Spectrum

- Modulácia: SS Chirp-FSK
- Počet kanálov: 10
- Veľkosť správy: 256 B
- Rýchlosť prenosu: 250 bps až 50 kbps
- Prenosové pásmo uplink: 125 až 250 kHz
- Prenosové pásmo downlink: 125 kHz
- Frekvencia: 868 MHz (ETSI), 913 MHz (FCC)
- Počet správ za deň: neobmedzený
- Vysielač výkon: 14 dBm
- Citlivosť: -140 dBm
- Dosah v teréne: 40 km v teréne, 15 km v prímestskom prostredí a 2-5 km v meste
- Zabezpečenie: šifrovanie AES128
- Výdrž na batériách: 5-15 rokov (podľa hustoty komunikácie)

1.1.5 Sigfox

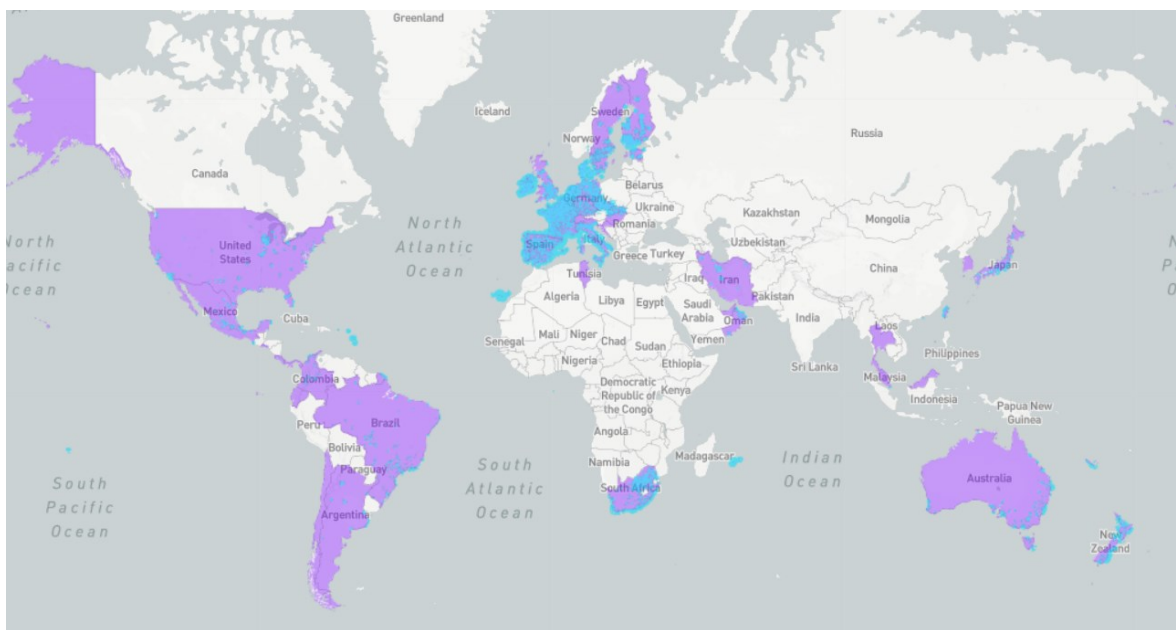
Sigfox je názov francúzskej firmy, ktorá vytvorila rovnomennú bezdrôtovú technológiu. Úlohou tejto technológie je prepojenie low-power zariadení, ako sú napr. elektromery, múdre hodinky, automatické pračky, ktoré sú neustále zapnuté a pritom vysielajú malý objem dát. Sigfox využíva technológiu ultra-narrow band (UNB). Je zavedená v niekoľkých krajinách sveta (Francúzsko-1200 základní, Španielsko-1300 základní, ...) a predpokladá expanziu do ďalších 50 krajín [9].

Parametre:

- Technológia: UNB
- Modulácia: DBPSK
- Spôsob prijmu: bez synchronizácie, MIMO
- Veľkosť správy: 0-12 B
- Rýchlosť prenosu: 100 b/s
- Doba prenosu a spracovania: 4-6s
- Frekvencia: 868 MHz (ETSI), 915 MHz (FCC)
- Maximálny počet správ za deň: 144
- Maximálny počet správ na BTS za deň: 9000000
- Vysielač výkon: 14 dBm

- Spätný kanál: 4 správy po 8 B denne
- Dosah v teréne: až 50 km v teréne, 3 km v meste pre indoor
- Spotreba: 5mA-45mA pri vysielaní, sub- μ A v kľúde
- Výdrž na batériách: 5-15 rokov (až 20 rokov na dve AA batérie)
- Zabezpečenie: certifikát, hash, šifrovanie možné na aplikačnej úrovni
- SLA: 99%

Ku dňu 14.5.2018 je globálne pokrytie siete Sigfox nasledovné (tyrkysovou farbou je vyznačená aktuálne pokrytá plocha, fialovou farbou je vyznačená plocha v štádiu pokrývania):



Obr. 2 Globálne pokrytie siete Sigfox [10].

1.1.6 ZigBee

ZigBee je bezdrôtová komunikačná technológia vystavaná na štandarde IEEE 802.15.4. Podobne ako Bluetooth je určená na spojenie low-power zariadení v sieťach PAN na malé vzdialenosti do 75 metrov. Multi-skokové ad-hoc smerovanie umožňuje komunikáciu aj na dlhšie vzdialenosti bez priamej rádiovkej viditeľnosti jednotlivých zariadení. Technológia má najšť primárne využitie v priemysle a senzorových sieťach. Pracuje v bezlicenčnom pásme (generálne povolenie) približne na frekvenciách 868 MHz, 902-928 MHz a 2,4 GHz. Prenosová rýchlosť je 20, 40, 250 kbit/s. V súčasnej dobe sa na vývoji a rozvoji tohto štandardu podieľa viac ako šesťdesiat firiem. Medzi nimi sú popredné svetové firmy z oboru automatizácie ako napr. Honeywell, Moto-

rola, Philips, Samsung, Omron, ABB, Siemens. ZigBee je navrhnutý ako jednoduchá a flexibilná technológia pre tvorbu rozsiahlejších bezdrôtových sietí, u ktorých nie je požadovaný prenos veľkého objemu dát. K jeho hlavným prednostiam patrí spoľahlivosť, jednoduchá a nenáročná implementácia, veľmi nízka spotreba energie a v neposlednej rade priaznivá cena. Vďaka týmto vlastnostiam nachádza uplatnenie v celej škále aplikácií, ktoré môžeme zaradiť do niekoľkých skupín [11]:

- Automatizácia budov (zabezpečenie, ovládanie svetiel, kontrola prístupu)
- Spotrebná elektronika (diaľkové ovládanie elektrospotrebičov)
- Počítačové periférie (bezdrôtové myši, klávesnice)
- Priemyselná automatizácia
- Zdravotníctvo (monitory pre pacientov)

Kvôli rôznorodosti predpokladaných aplikácií štandard definuje tri základné režimy prenosu dát [11]:

- Periodicky sa opakujúci (prenos dát zo snímačov)
- Nepravidelné prenosy (externé udalosti, napr. stisknutie tlačidla užívateľom)
- Opakujúce sa prenosy, u ktorých je požiadavka na malé oneskorenie (bezdrôtové počítačové periférie)

1.1.7 Z-Wave

Z-Wave je jedna z ďalších bezdrôtových komunikačných sietí, primárne určená na automatizáciu domácnosti. Jej základom je mesh sieť, pomocou ktorej komunikujú jednotlivé zariadenia medzi sebou. Typickými príkladmi zariadení sú osvetlenia, termostaty, žalúzie atď., ktoré ovládame tabletom, kľúčenkou alebo iným kompatibilným zariadením [12] [13].

Parametre [13]:

- Frekvencia: ISM 868 Mhz (EU)
- Rýchlosť prenosu dát: 100 kbit/s
- Priepustnosť: 40 kbit/s
- Maximálny dosah M2M: 30 m
- Maximálny počet skokov správy: 4

2 SENZORY PRE APLIKÁCIE IOT

V aplikáciách IoT je možné použiť akékoľvek senzory alebo aktuátory. Systém, ktorý je predmetom tejto bakalárskej práce, bude využívať predovšetkým akcelerometer, GNSS modul a rádiový modul. O problematike týchto sensorov sa budeme venovať v nasledujúcich podkapitolách.

2.1 Akcelerometer

Akcelerometer je elektromechanické zariadenie, merajúce statické (gravitačné) ako aj dynamické (pohyb, vibrácie) zrýchlenie. Vývoj technológie MEMS umožnila použitie akcelerometra aj mimo pôvodne určené aplikácie. Stali sa menšie, presnejšie a spotrebávajú menej energie. Uplatnenie našli v priemysle, mobilných telefónoch ale aj v bezpečnostne kritických odvetviach ako je letecký priemysel.

2.1.1 Základné rozdelenie

Vhodným akcelerometrom môžeme merať zrýchlenie v jednej alebo viacerých osiach. Momentálne na trhu súperia o pokrytie všetkých aplikácií dve hlavné metódy merania zrýchlenia a to piezoelektrická a kapacitná.

Piezoelektrický akcelerometer produkuje na podnet mechanického stresu elektrický náboj. Na rozdiel od piezoelektrického, piezoodporový reaguje na deformáciu zmenou elektrického odporu. Tieto zariadenia negenerujú odozvu na statickú záťaž, ale sú vhodné na meranie šokových nárazov.

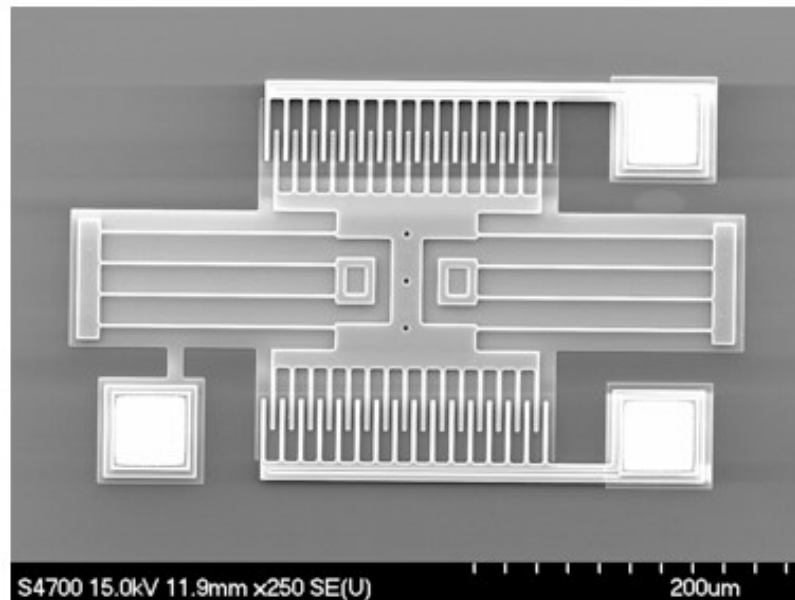
Kapacitný akcelerometer poskytuje odozvu na statickú ale aj dynamickú záťaž.

2.1.2 Princíp funkčnosti kapacitného MEMS akcelerometra

Kapacitné akcelerometre majú niekoľko výhod. Vo väčšine prípadov výroby pomocou mikro-obrábacích technológií je potrebné minimálne alebo žiadne dodatočné spracovanie. Kondenzátory môžu operovať ako senzory, ale aj ako aktuátory. Majú vysokú senzitivitu a jeho prevodový mechanizmus je nezávislý na teplote. Kapacitné meranie je nezávislé na použitom materiáli základne a spolieha sa na zmenu kapacity zmenou geometrie samotného kondenzátora. Pri zanedbaní trecieho efektu hrán, vypočítame kapacitu paralelných dosiek ako [14]:

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_A \frac{1}{d},$$

kde $\varepsilon_A = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{A}{d}$, A je plocha elektród, d je vzdialenosť medzi elektródami a ε je permitivita oddeľovacieho materiálu. Zmena týchto parametrov sa prejavuje zmenou kapacity. Variácia týchto troch parametrov bola použitá pri meraní MEMS technológiou. Napríklad senzory vlhkosti môžu byť založené na zmene ε , akcelerometre na zmene vzdialenosti d alebo A . Ak je dielektrikum kondenzátora vzduch, kapacitné meranie je v podstate nezávislé na teplote. Nevýhodou oproti piezoelektrickému meraniu je zložitosť čítacej elektroniky. Citlivosť metódy môže byť veľmi vysoká, napríklad firma Analog Devices použila na zostrojenie akcelerometra comb drive kondenzátor s premennou medzerou medzi elektródami. Merania preukázali, že integrovaná elektronika dokáže rozlíšiť zmenu vzdialenosti elektród 20 pm, t. j. $\frac{1}{5}$ vzdialenosti medzi dvoma atómami silikónu [14].



Obr. 3 Comb drive mikro-obrábaný rezonátor [15].

Typický MEMS akcelerometer je zostrojený z pohyblivej seizmickej hmoty (zvaná „proof mass“) s platňami, ktoré sú pripevnené pomocou systému mechanického zavesenia k referenčnému rámu, vid'. obrázok (Obr. 4). Pohyblivé a fixné platne reprezentujú platne kondenzátora. Výchylka referenčnej hmoty je zmeraná pomocou rozdielu kapacity. Kapacity medzi pohyblivými platňami a vonkajšími fixnými C_1 a C_2 sú funkciou príslušných posuvov x_1 a x_2 [14]:

$$C_1 = \varepsilon_A \frac{1}{x_1} = \varepsilon_A \frac{1}{d + x} = C_0 - \Delta C \quad (1)$$

$$C_2 = \varepsilon_A \frac{1}{x_2} = \varepsilon_A \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C \quad (2)$$

Pri nulovej akcelerácii sa kapacity C_1 a C_2 rovnajú pretože $x_1 = x_2$. Vychýlenie z kludovej polohy x referenčnej hmoty je výsledkom akcelerácie. Ak $x \neq 0$, rozdiel kapacity je [14]:

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\varepsilon_A \frac{x}{d^2 - x^2} \quad (3)$$

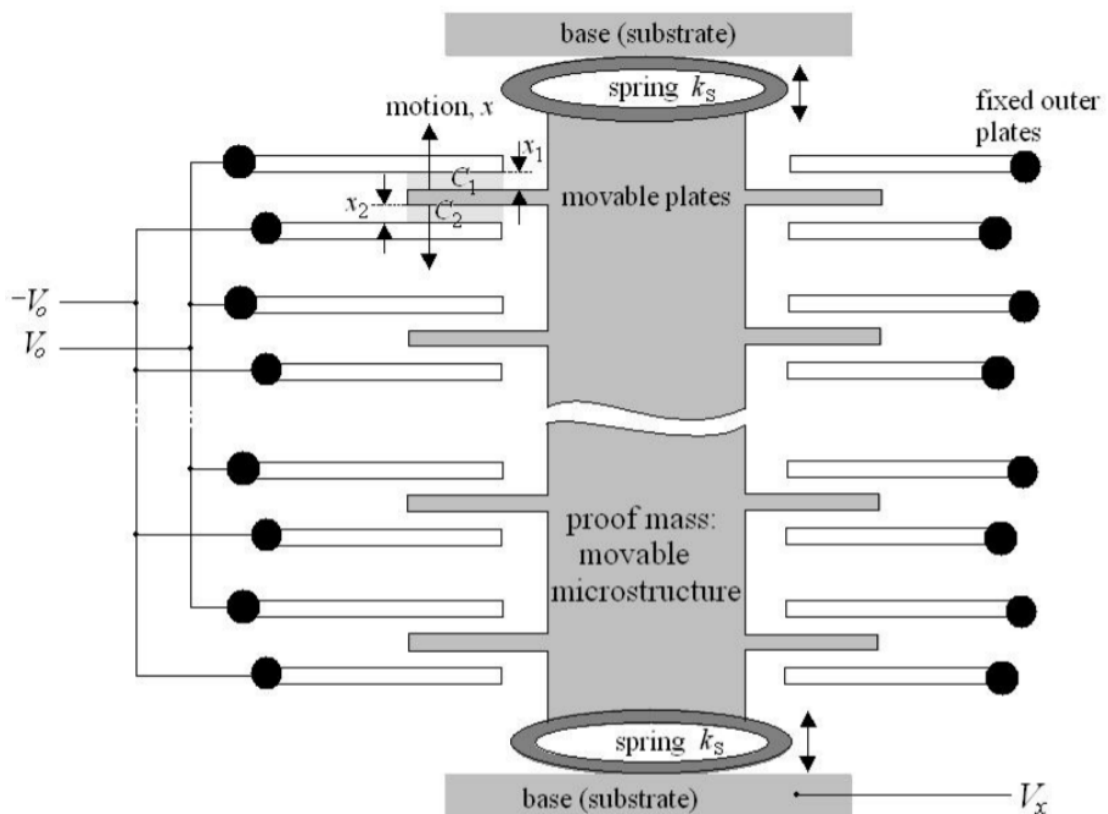
Meraním ΔC , môžeme vypočítať výchylku x vyriešením nelineárnej algebrickej rovnice [14]:

$$\Delta C x^2 + \varepsilon_A x - \Delta C d^2 = 0 \quad (4)$$

Táto rovnica môže byť ďalej zjednodušená. Pre malé vychýlenia môžeme $\Delta C x^2$ zanedbať. Po úprave nám ostáva [14]:

$$x \approx \frac{d}{\varepsilon_A} \Delta C = d \frac{\Delta C}{C_0} \quad (5)$$

Zo vzorca môžeme vidieť, že výchylka referenčnej hmoty x je aproximačne proporcionálna rozdielu kapacít ΔC [14].



Obr. 4 Štruktúra akcelerometra [14].

Na obrázku (Obr. 4) vidíme senzor, ktorý sa skladá z viacerých setov kondenzátorov. Všetky vrchné kondenzátory sú zapojené paralelne a predstavujú celkovú kapacitu C_1 . Všetky spodné predstavujú celkovú kapacitu C_2 . Bez väčšieho počtu kondenzátorov by sme neboli schopní určiť rozdiel kapacít [14].

2.1.3 Štandardné komunikačné rozhrania MEMS akcelerometra

Štandardne používané rozhrania MEMS zariadení zahŕňujú PWM, digitálny a analógový výstup.

2.1.3.1 Čítanie hodnôt zrýchlenia

Hodnota zrýchlenia je vyjadrená ako dvojkový doplnok čísla zarovnaná doľava a je rozdelená do dvoch registrov s prefixom `_H` (horný bajt) a `_L` (spodný bajt). Prepočet obsahu registrov na hodnotu zrýchlenia v jednotkách mg:

$$a_x = OUT_X * S_o \quad (6)$$

Kde `OUT_X` je obsah registrov (v tomto prípade os X), S_o je senzitivita vyjadrujúca hodnotu v mg na 1 LSB. Výsledná hodnota akcelerácie registra jednej z osí:

$$OUT_X = (OUT_X_H \ll 8) + OUT_X_L \quad (7)$$

Senzitivita je závislá na maximálnom rozsahu FS (full-scale) akcelerácie:

$$S_o = \frac{2 * FS}{2^{16}} \left[\frac{\text{mg}}{\text{digit}} \right] \quad (8)$$

2.1.4 Výpočet náklonu zariadenia

Na určenie náklonu zariadenia musíme vyfiltrovať dynamickú zložku akcelerácie. Na tento účel nám postačí softvérová dolná priepust:

$$a_{if} = a_i + \alpha * (a_{i-1} - a_i) \quad (9)$$

Kde a_{if} reprezentuje akceleráciu vyfiltrovanú o danú zložku, a_i je aktuálna hodnota akcelerácie, a_{i-1} je hodnota z predchádzajúceho výpočtu. Parameter α je v intervale $\langle 0; 1 \rangle$ a udáva aká váha bude pridelená časti s vysokou frekvenciou. Malá hodnota α vo veľkej miere odfiltruje dynamickú zložku akcelerácie, nechávajúc iba zložku statickú (gravitačnú). Nevýhodou takto zvolenej veľkosti je dlhá doba ustálenia filtra, rádovo niekoľko ms.

Náklon zariadenia sa udáva v Eulerových uhloch a to v α (pitch), β (roll), γ (yaw). Uhol γ je pre našu aplikáciu zbytočný a bez dodatočných informácií od iných senzorov (ako je napr. gyroskop) nemáme dostatok informácií na jeho výpočet.

Dodávateľ akcelerometru udáva vzorce na výpočet uhlov α , β , ktoré zabezpečujú konštantnú citlivosť naprieč 360° otáčania [16]:

$$\text{Pitch} = \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{A_{x1}}{\sqrt{(A_{y1})^2 + (A_{z1})^2}} \right) \quad (10)$$

$$\text{Roll} = \beta = \tan^{-1} \left(\frac{A_{y1}}{\sqrt{(A_{x1})^2 + (A_{z1})^2}} \right) \quad (11)$$

Rovnice udávajú interval uhlov $(0; 180)$. Z toho vyplýva, že bez dodatočného spracovania údajov nie sme schopný rozlíšiť medzi, napr. 40° náklonom dolu alebo hore hlavou.

2.2 Globálny družicový polohový systém

Globálny družicový polohový systém (GNSS) je generické označenie služby, umožňujúcu, za pomoci satelitných družíc, autonómne priestorové určovanie polohy s celosvetovým pokrytím. Užívatelia tejto služby používajú malé elektronické rádiové prijímače, ktoré na základe odoslaných signálov z družíc, umožňujú vypočítať ich polohu s presnosťou na desiatky až jednotky metrov. Presnosť v špeciálnych alebo vedeckých aplikáciách môže byť niekoľko centimetrov až milimetrov.

Satelitné družice GNSS pracujú vo frekvenčnom pásme 1 MHz až 2 MHz. Každý satelitný systém obsahuje v konštelácii 20-30 satelitov, obiehajúcich zemeguľu vo výške 20 000 až 22 000 km nad jej povrchom.

2.2.1 GNSS systémy

Od 20. storočia vznikajú rôzne globálne, ale aj lokálne GNSS systémy. Vznikajú z rôznych dôvodov ako zastaranosť stávajúcich systémov, konkurencií štátov alebo združení, ktoré systém implementovali (v osemdesiatych rokoch USA-GPS a ZSSR-GLONASS), ale aj špecifické zameranie systému, napr. na vojenskú činnosť.

V podkapitolách nižšie, v krátkosti uvedieme základne parametre majoritne používaných satelitných systémov. Pozemné systémy (WAAS, EGNOS, ...), určené na zlepšenie vlastností GNSS, vynecháme.

2.2.1.1 GPS

Primárne vojenský systém, bol vyvinutý v roku 1978 ministerstvom obrany Spojených štátov. Je to najznámejší a najpoužívanejší systém v civilnej sfére. Aktuálne je vo vesmírnom a kontrolnom segmente udržiavaný a vyvíjaný leteckou zložkou Spojených štátov amerických [17].

Systém má globálne pokrytie. GPS satelity obiehajú v strednej obežnej výške zeme, vo výške 20 200 km. Ku dňu 14.3. 2018 je v konštelácií GPS 31 funkčných satelitov, z toho je dvanásť zastaraných BLOCK IIR, sedem BLOCK IIR-M a dvanásť najmodernejších modelov satelitných GPS družíc typu BLOCK IIF [18].

2.2.1.2 GLONASS

GLONASS je GNSS prevádzkovaný ministerstvom obrany Ruskej Federácie. Jeho úlohou je poskytovať civilným a obranným zložkám presnú pozíciu, rýchlosť a čas na globálnej báze. Ku dňu 25.4.2018 je satelitná konštelácia tvorená celkovo 25 satelitmi, z toho sú 2 mimo prevádzky (údržba, testovacie účely) [19], ktorých dráha je v strednej obežnej výške Zeme.

2.2.1.3 Galileo

Civilný GNSS systém spravovaný Európou. Jeden z jeho hlavných dôvodov vzniku bolo vojenské pozadie a správa ozbrojenými zložkami zvyšných navigačných systémov. V dnešnom stave nie je plne funkčný, s odhadovaným dokončením v roku 2020. Systém ma obsahovať 30 satelitov obiehajúcich planétu vo výške cirka 21 000 km.

2.2.1.4 BeiDou

Čínsky satelitný systém s lokálnym pokrytím v Ázii. Do prevádzky bol uvedený v decembri roku 2012. Vyslanie poslednej družice na obežnú dráhu je naplánované na koniec roka 2020. V plnej forme bude systém obsahovať 35 satelitov.

2.2.2 Obecná architektúra GNSS

Družicové polohové systémy sú obecné tvorené troma základnými segmentami:

- Kozmický
- Riadiaci
- Užívateľský

2.2.2.1 *Kozmický segment*

Je tvorený sústavou umelých družíc Zeme, obiehajúcich po známych, presne definovaných a určených obežných dráhach. Kozmický segment je definovaný [20]:

- Typom obežných dráh (nízke, stredné, vysoké, geostacionárne, kruhové alebo eliptické)
- Výškou, sklonom a počtom obežných dráh
- Počtom rozmiestnených družíc na obežných dráhach

Konfigurácia kozmického segmentu je daná požiadavkami užívateľského segmentu a možnosťami riadiaceho segmentu [20].

2.2.2.2 *Riadiaci segment*

Je tvorený sústavou pozemných staníc, ktoré plnia radu úloh [20]:

- Monitorovanie signálov družíc kozmického segmentu
- Vyhodnocovanie chovania družíc na obežných dráhach a určovanie parametrov obežných dráh jednotlivých družíc
- Vyhodnocovanie chovania zdroja hodinového signálu v družiciach a určovanie korekčných parametrov
- Sledovanie a vyhodnocovanie stavu družíc
- Vysielanie aktualizovaných parametrov družiciam
- Manévry družíc
- Údržba družíc
- Riadenie celého systému

Za týmto účelom sa v pozemnom segmente spravidla rozlišujú tri typy staníc [20]:

- Monitorovacie stanice - sú rozmiestnené tak, aby umožňovali sledovanie čo najväčšieho počtu družíc po čo najdlhšiu dobu; monitorujú signály vysielané družicami kozmického segmentu a prenášajú ich do centra
- Hlavná riadiaca stanica – je spravidla jedna (plus jedna záložná), spracováva signály z monitorovacích staníc, modeluje chovanie kozmického segmentu, určuje parametre obežných dráh a korekčné parametre družicových hodín a výsledky predáva na stanice určené na komunikáciu s kozmickým segmentom

- Stanice pre komunikáciu s kozmickým segmentom – spravidla sú totožné s monitorovacími stanicami; slúžia k prenášaniam novo určených parametrov obežných dráh a korekčných parametrov atómových hodín umiestených na družiciach a taktiež slúži k ich ovládaniu

Konfigurácia riadiaceho segmentu je daná predovšetkým obrannou stratégiou štátu, budujúceho a prevádzkujúceho družicový polohový systém (v prípade vojenského systému), respektíve možnosťami rozmiestnenia a prevádzkovania staníc pozemného segmentu na svojom území, prípadne na území iných štátov (v prípade civilného systému) [20].

2.2.2.3 Užívateľský segment

Je tvorený technickými zariadeniami, ktoré umožňujú, uľahčujú, respektíve rozširujú možnosti využitia družicového polohovacieho systému postupmi merania, vyhodnocovania a samotnými užívateľmi. Jeho „konfigurácia“ je plno podriadená požiadavkám užívateľov, technickými možnosťami a obmedzeniami kozmického segmentu (s riadiacim segmentom užívateľa do priameho styku neprichádzajú) [20].

2.2.3 Satelitné družice GNSS

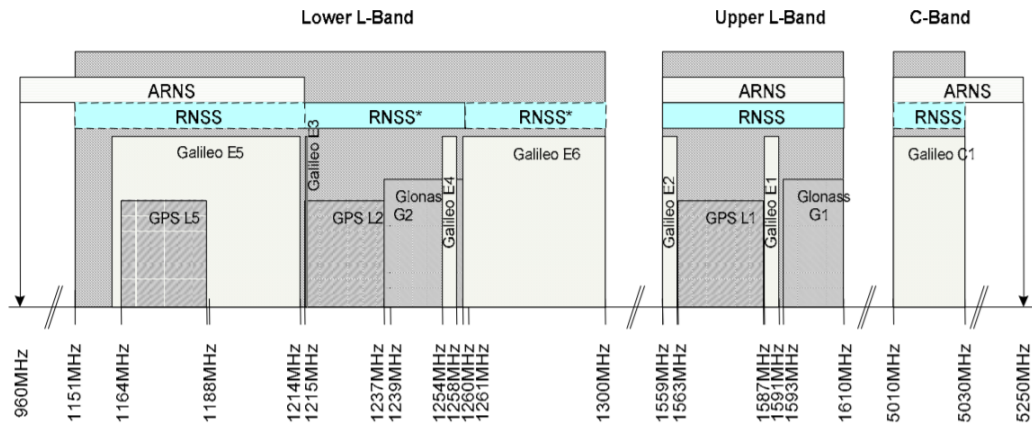
Existuje viacero GNSS konštelácií obiehajúcich Zem. Satelitná konštelácia je usporiadané zoskupenie satelitov na orbite, typicky 20 až 30, ktorých účel je poskytovať požadované plošné pokrytie (globálne, lokálne).

GNSS satelity obiehajú vysoko nad atmosférou, okolo 20 000 km nad povrchom Zeme. Pohybujú sa rýchlosťou niekoľko tisíc kilometrov za hodinu. Vďaka vákuu vesmíru sú trajektórie satelitov v tejto výške veľmi stabilné a predvídateľné. Satelitné družice poznajú údaje o zdanlivej polohe pohyblivých astronomických objektov (efemeridy) v čase, spolu s časom, ktorý udávajú presné atómové hodiny. Hodiny disponujú presnosťou $10^{11} \pm 5$, dodatočne sú synchronizované presnejšími pozemnými hodinami založenými na césiu.

2.2.4 Satelitné signály GNSS

Doposiaľ zmienené signály, vyslané zo satelitných družíc, nesú spoločný názov GNSS signály, resp. satelitné signály. Jednotlivé satelitné systémy majú špecifické charakteristiky signálov. Napriek týmto odlišnostiam sú navzájom kompatibilné, aby zamedzili vzájomnej interferencií. Výhodu tejto kompatibility využijeme na strane hardvéru prijímača, ktorý sig-

nály z rôznych GNSS následne spracováva. Na obrázku (Obr. 5) nižšie môžeme vidieť frekvenčné spektrum, použiteľné pre rádiovo navigované satelitné systémy (Radio-Navigation Satellite Systems - RNSS) [21].



Obr. 5 RNSS frekvenčné spektrum pre GNSS signály [21].

2.2.4.1 Signály vysielané družicami GPS

Každý signál vyslaný družicou GPS je kombináciou nosnej vlny, diaľkomerného kódu a navigačnej správy. Vytváranie vyslaného signálu prebieha v celej rade krokov. Vychádza sa pritom z faktu, že všetky zložky signálu sú odvodené násobením a delením základnej frekvencie.

Družice vysielajú signály na troch nosných frekvenciách L1, L2 a L5. L1 (1575,42 MHz) je modulovaná dvoma diaľkomernými kódmi reprezentovanými tzv. pseudonáhodnými šumami (angl. Pseudo Random Noise - PRN). Jedná sa o presný alebo taktiež P-kód (angl. Precision alebo P-code), ktorý môže byť pre vojenské účely zašifrovaný (po zašifrovaní nesie názov Y-kód), alebo ako dostupný C/A kód (angl. Coarse/Acquisition alebo C/A code), ktorý nie je šifrovaný. Druhá frekvencia označovaná L2 (1227,6 MHz) je modulovaná iba P-kódom (resp. jeho šifrovanou variantov-Y-kódom). Väčšina civilných prijímačov užíva pre meranie iba C/A kód. Zavedením najmodernejších satelitných družíc typu IIF, je zavedený nový signál L5 prenášaný na novej nosnej frekvencii 1176,45 MHz. Na tejto frekvencii je prenášaný kód F (angl. Fine Code), ktorý má frekvenciu 10,23 MHz a periódu 1 ms [20].

Signály modulujúce prvú nosnú frekvenciu L1 sa označujú ako signály štandardnej polohovej služby (angl. Standard Positioning Service - SPS). Frekvencia L2 je používaná pre presnú polohovú službu (angl. Precise Positioning Service - PPS) a umožňuje merať oneskorenie signálov pri priechode ionosférou. Je využívaný iba špeciálne vybavenými prijímačmi.

Okrem P-kódu a C/A je oboma nosnými frekvenciami prenášaný ešte binárny kód, obsahujúci navigačnú správu, ktorá je kódovaná pomocou posunov fáze nosných vln. Poskytovateľ GPS, teda ministerstvo obrany USA, má možnosť kedykoľvek znížiť presnosť tohto systému tzv. selektívnou dostupnosťou (angl. Selective Availability - SA). Tá zníži presnosť C/A kódu tak, že pozemné prijímače môžu vypočítať svoju polohu s chybou až 100 m. Chybu vnesenú selektívnou dostupnosťou je možné takmer celkom eliminovať pomocou diferenčnou korekciou, ktorá môže zvýšiť presnosť určovania polohy až na 1 m [20].

2.2.4.1.1 Základná frekvencia

Všetky frekvencie signálov sú odvodené od tzv. základnej frekvencie (angl. fundamental frequency) $f_0 = 10,23$ MHz. Tá je odvodená z frekvencie atómových hodín a jej presná hodnota je nastavená tak, aby boli eliminované relativistické efekty, spôsobené pohybom družíc [20].

2.2.4.2 Signály vysielané družicami GLONASS

Signály družíc GLONASS sú vysielané na dvoch nosných frekvenciách (označované opäť L1 a L2), ktoré sa však (na rozdiel od systému GPS) pre každú družicu mierne líšia. Platia tu nasledujúce vzťahy [20]:

$$L1 = 1602 \text{ MHz} + n \cdot 0,5625 \text{ MHz} \quad (12)$$

$$L2 = 1246 \text{ MHz} + n \cdot 0,4375 \text{ MHz} \quad (13)$$

kde n je číslo kmitočtových kanálov.

Pôvodne systém GLONASS používal plný rozsah kmitočtových kanálov (teda pre každú družicu unikátne číslo). Dnes, vzhľadom k problémom s interferenciou s blízkym oknom vyhradeným pre rádio-astronomické pozorovania, bolo rozhodnuté, že bude počet používaných kmitočtových kanálov znížený (vynechaním kanálov 15 až 20) a družice nachádzajúce sa na opačných stranách obežnej dráhy zdieľajú rovnaký kmitočtový kanál. Družice tohto systému vysielajú dva typy navigačných signálov [20]:

- Navigačný signál štandardnej presnosti (angl. Standard Precision Navigation Signal – SP, resp. Channel of standard Accuracy - CSA), ktorý je prenášaný iba na nosnej frekvencii L1 a je obdobou C/A kódu systému GPS; jedná sa o pseudonáhodnú postupnosť 511 núl a jednotiek, vysielaných frekvenciou 0,511 MHz (sekvencia sa teda opakuje čo 1 ms, všetky družice vysielajú rovnakou frekvenciou)

- Navigačný signál vysokej presnosti (angl. High Precision Navigation Signal – HP, resp. Channel of High Accuracy - CHA) je prenášaný na oboch nosných frekvenciách L1 a L2; je obdobou P-kódu systému GPS; jedná sa o pseudonáhodnú postupnosť núl a jednotiek, vysielaných frekvenciou 5,11 MHz, ktorých pôvodná dĺžka 33 554 423 bitov je skrátaná tak, aby sa opakovala čo 1 s; všetky družice opäť vysielajú rovnakú sekvenciu

Frekvencia a časovanie signálov sú odvodené od jedných z troch atómových hodín na báze cézia, umiestnených na družici. Hodiny pracujú na frekvencii 5 MHz. Intenzita signálov na povrchu Zeme je zrovnateľná so systémom GPS. Každá družica vysielala súčasne s navigačným signálom štandardnej presnosti navigačnú správu, ktorá obsahuje [20]:

- Efemeridy družice dané vo formáte:
 - Presnej polohy družice v danom čase
 - Zložiek vektoru rýchlosti družice
 - Zložiek vektoru zrýchlenia družice
- Posun hodín družice vzhľadom k systémovému času GLONASS (angl. GLONASS System Time) a k UTC (RF)
- Korekcia družicového času na čas GLONASS
- Kalendárne číslo dňa v rámci štvorročnej periódy, s počiatkom v prestupnom roku
- Číslo družice v systéme
- Príznak stavu družice
- Almanach GLONASS

Navigačná správa je dlhá 7500 bitov, jej odvysielanie trvá 2,5 minúty a je rozdelená do piatich tridsať sekundových rámcov, ktoré sa ďalej delia na pätnásť 100 bitových pod rámcov. Každý rámeč pritom vždy obsahuje efemeridy a posun hodín družice [20].

2.2.4.3 Signály vysielané systémom Galileo

Systém Galileo pokrýva štyri frekvenčné pásma:

- E1 – nosná frekvencia 1575,42 MHz
- E6 – nosná frekvencia 1278,75 MHz
- E5 – nosná frekvencia 1191,795 MHz
 - E5a – nosná frekvencia 1176,45 MHz

- E5b – nosná frekvencia 1207,14 MHz

E5a a E1 prekrývajú existujúce frekvenčné pásmo L5 a L1 GPS signálov. Minimálna sila prijatého signálu systému Galileo je -152dBW, dvakrát väčšia ako sila C/A kódu GPS [22].

Navigačné dáta systému Galileo obsahujú základné informácie, potrebné pre výpočet polohy užívateľa. Príkladom týchto informácií môže byť poloha družíc, alebo chyby chodu družicových hodín, ktoré sú presne určené pozemným segmentom (informácie sú pravidelne prenášané zo Zeme všetkým Galileo družiciam). Družice využívajú frekvenčné pásmo (bližšie spomenuté vyššie) od 1100 do 1600 Mhz. Jedná sa o frekvenčné pásmo vhodné pre mobilnú navigáciu a komunikačné služby. Družice vysielajú 10 rôznych navigačných signálov, ktoré sú využité v štyroch (pôvodne piatich) službách [23].

Služby systému Galileo boli definované v základnej fáze vývoja komunitou užívateľov a členských štátov EU. Tieto služby sú definované v štyrmi skupinami [24] [25]:

- Základná služba (angl. Open Service - OS) – bezplatne dostupná služba, poskytujúca čas a polohu s presnosťou do jedného metra
- Komerčná služba (angl. Commercial Service - CS) – služba dopĺňujúca základnú službu, využíva ďalšie dva signály (E6a, E6b); služba je šifrovaná poskytovateľmi služieb a budúcimi operátormi systému; prístup je kontrolovaný na úrovni prijímača, ktorý využíva prístupové kľúče
- Verejne regulovaná služba (Public regulated Service - PRS) – dva šifrované signály (E1a, E6a) s kontrolovaným prístupom a dlhodobou podporou, určená pre štátom vybraných užívateľov, predovšetkým pre bezpečnostné zložky štátu
- Vyhľadávajúca a záchranná služba (angl. Search and Rescue Service - SAR) – služba núdzovej lokalizácie v rámci celosvetovej družicovej záchranej služby COSPAS-SARSAT s možnosťou obojstrannej komunikácie

Rozlišujú sa signály obsahujúce navigačné dáta (dátové kanály, angl. data channels) a signály, ktoré nenesú žiadne dáta (pilotné kanály, angl. pilot channels). Dátové a pilotné kanály sú voči sebe fázovo posunuté o 90°, vďaka tomuto posunu môžu byť tieto kanály prijímané oddelene [23].

2.2.4.3.1 Galileo kódy

Všetky družice satelitného systému Galileo vysielajú na rovnakej frekvencii. To znamená, že Galileo signál E1 je vyslaný na frekvencii 1575,42 MHz z každej družice. Preto sa pomocou modulácie k signálu pridáva kód, vďaka ktorému sú prijímače schopné rozpoznať družicu vysielajúcu tento signál. Pomocou kódu sa meria aj doba, za ktorú signál urazil vzdialenosť medzi danou družicou a prijímačom (základné meranie využité pre zistenie polohy prijímača). Kód je originálny pre každú družicu. Kód v tomto prípade môžeme prirovnať ku kľúču. Pri identifikácii družicového signálu prijímačom sa porovnáva prijatý kód signálu, s presnou kópiou signálu, ktorý je uložený v prijímači. Ak sa kódy zhodujú tak sa prijímací kanál tzv. otvorí. V opačnom prípade sa prijímač pokúša porovnať signál s ostávajúcimi družicami [23].

2.2.5 Propagácia signálov GNSS

Na určenie pozície a času, musí prijímač určiť priamu vzdialenosť medzi ním a družicou satelitu. Určenie tejto vzdialenosti komplikuje fakt, že signál musí prechádzať rôznymi nehomogénnymi vrstvami atmosféry, čím sa jeho trajektória zakrivuje (rádiové vlny sa šíria priamočiaro iba v homogénnych médiách). Toto zakrivenie zvyšuje dobu letu signálu od satelitu k prijímaču. Vzdialenosť obsahujúca chybu zakrivenia nesie názov pseudo-vzdialenosť (angl. Pseudo range) [26].

Na propagáciu signálov GNSS má z atmosféry najväčší vplyv ionosféra, vrstva 70 až 1000 km nad povrchom Zeme. Ultrafialové slnečné lúče ionizujú plynné molekuly v tejto vrstve, čím sa uvoľňujú voľné elektróny, ktoré ovplyvňujú elektromagnetické satelitné signály [26]. Vzniká chyba ionosférickej refrakcie (angl. ionospheric refraction error). Vo vertikálnom smere môže za určitých podmienok táto chyba dosiahnuť až 30 m. Pri prijímaní signálov z družíc na horizonte, je táto chyba v typických príkladoch trikrát väčšia. Je premenlivá v čase a priestore. Vplyv ionosféry je závislý na frekvencii prechádzajúcej vlny, takže sa dá vhodným usporiadaním merania eliminovať (preto GNSS družice vysielajú na viacerých frekvenciách L1, L2, E1, E5, ...) [20].

Ďalšia vplyvná vrstva atmosféry na určenie vzdialenosti je troposféra, ktorá vnáša chybu troposférickej refrakcie (angl. tropospheric refraction error). Vo vertikálnom smere môže dosahovať až 2,3 m. V prípade signálu prijímaného z družíc na horizonte, môže táto chyba byť až desaťkrát väčšia [20]. Vplyv troposféry nie je závislý na frekvencii rádiovkej vlny, ale na teplote, tlaku a vlhkosti. Chybu eliminujeme na základe odhadu vneseného oneskorenia, ktorý sa určí pomocou modelu troposféry [26].

2.2.6 Určenie polohy

V prípade globálnych družicových navigačných systémov, sa vzdialenosti medzi prijímačom a navigačnými družicami určuje pomocou doby šírenia signálu od družice ku prijímaču. Prijímač určuje čas t_{di} , ktorý potrebuje signál k tomu, aby dorazil z navigačnej družice, nachádzajúcej sa na mieste so súradnicami (x_i, y_i, z_i) , do miesta merania o súradniciach (X, Y, Z) , rýchlosťou šírenia rádiových vln (rovná rýchlosti svetla c). Teoreticky stačí, aby sme zmerali vzdialenosti od troch navigačných družíc a môžeme polohu neznámeho bodu určiť vyriešením sústavy troch rovníc o troch neznámych [20]:

$$t_{d1} \cdot c = \sqrt{(x_1 - X)^2 + (y_1 - Y)^2 + (z_1 - Z)^2} \quad (14)$$

$$t_{d2} \cdot c = \sqrt{(x_2 - X)^2 + (y_2 - Y)^2 + (z_2 - Z)^2} \quad (15)$$

$$t_{d3} \cdot c = \sqrt{(x_3 - X)^2 + (y_3 - Y)^2 + (z_3 - Z)^2} \quad (16)$$

Diaľkomerné signály jednotlivých družíc je nevyhnutné od seba odlišiť. K tomu ide využiť niektorý z nasledujúcich spôsobov [20]:

- odlišenie na základe frekvencie nosnej vlny (tzv. frekvenčné delenie), kde každá zo súčasne viditeľných družíc používa pre prenos signálov nosnú frekvenciu s inou frekvenciou; prijímač musí byť schopný prijímať nosné vlny všetkých frekvencií
- odlišenie na základe kódu (tzv. kódové delenie), kde všetky družice navigačného systému vysielajú na nosnej vlne s rovnakou frekvenciou, s rozdielom diaľkomerného kódu, ktorý je pre každú družicu iný; prijímač musí byť schopný identifikovať v prijatých signáloch jednotlivé diaľkomerné kódy
- odlišenie na základe doby vysielania (tzv. časové delenie), kde všetky družice navigačného systému vysielajú ten istý kód na rovnakej frekvencii nosnej vlny, v presne definovaných časových intervaloch

Ako diaľkomerné kódy sa spravidla používajú tzv. pseudonáhodné signály (angl. Pseudo Random Noise - PRN). Ak porovnáme dva odlišné diaľkomerné kódy, je výsledný signál veľmi slabý, ale ak porovnáme dva rovnaké kódy, ktoré sú len fázovo posunuté, je ich výsledkom signál výrazne silnejší. Pseudonáhodné signály sú periodické, generujú sa podľa určitých algoritmov. Publikovaním alebo utajením týchto algoritmov ide užívateľom povoliť, alebo znemožniť prístup k navigačnému systému alebo k niektorým službám, ktoré poskytuje [20].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 POŽIADAVKY NA ZARIADENIE

Základom reálneho projektu s očakávaným výstupom je určenie parametrov (resp. požiadavkov), ktoré má tento výstup splňovať. Parametre majú byť jednoznačne definované, merateľné, relevantné a v neposlednej rade majú byť dosiahnuteľné.

Na túto prácu sme určili tieto požiadavky:

- minimálna veľkosť zariadenia
- zariadenie typu stand-alone
- jednostranné osadenie súčiastok
- zariadenie má byť napájané externým zdrojom energie, t. j. batériou
- zariadenie má byť schopné pracovať po dobu minimálne 5 rokov na jedno nabitie batérie
- minimálny odber jednotlivých modulov a celkového zariadenia (maximálna úspora energie)
- dosiahnutie dostatočných parametrov antén na príjem GNSS signálov a vyslanie a príjem správ do siete IoT SigFox (vzdialenosť rádovo v km)
- zariadenie má byť plno programovateľné

4 VÝBER SIETE, HARDVÉROVÝCH MODULOV A KOMPONENTOV

Hardvérové komponenty sme vybrali tak, aby odpovedali zadaniu práce. To znamená, že sme dbali na veľkosť púzdra, dostupnosť a cenu. Pri výbere modulov a SoC sme sa riadili ich okamžitou dostupnosťou (t. j. ich dostupnosťou vo forme modulu alebo na vývojových doskách, bez nutnosti integrovania na vlastný PCB), trhovou dostupnosťou a komunikačným rozhraním.

4.1 Výber IoT siete

Na základe zadania práce sme vybrali komunikačnú technológiu SigFox. V dobe výberu (rok 2016) mala najväčšie plošné pokrytie (ku 16.5.2018 je pokrytie na celom území ČR). Jej hlavný konkurent sa stala technológia LoRaWAN. Naša aplikácia nevyžaduje obojstrannú komunikáciu, ktorú prináša LoRaWAN.

4.2 MCU STM32L073CZTx

Procesor je primárne určený na aplikácie napájané batériou. Má 32-bitové jadro Arm[®] Cortex[®]-M0+ s maximálnou frekvenciou 32 MHz. Poskytuje veľký výber zdroja hodinového signálu, low-power módov. Nové nezávislé periférie (USART, I²C, ...) redukujú vyťaženie jadra procesora, ktorý môže počas činnosti periférií spať. Vybrané parametre [27]:

- Platforma ultra-low-power
 - napájacie napätie 1,65 až 3,6 V
 - prevádzková teplota -40 až 125 °C
 - odber 0,29 μ A v Standby móde
 - odber 0,43 μ A v Stop móde
 - odber 93 μ A/MHz v Run móde
- Pamäť
 - 192 KB FLASH rozdelenej na dve banky s ECC
 - 20 KB RAM
 - 6 KB EEPROM s ECC
 - 20 B zálohový register
- Rozhrania

- 84 I/O (74 je 5V tolerantných)
- 4x USART
- 3x I²C
- 6x SPI
- Puzdro LQFP48 7x7 mm

4.3 Akcelerometer LIS3DH

LIS3DH je trojosí lineárny kapacitný nano MEMS akcelerometer od Francúzsko-Talianskej firmy STMicroelectronics, ktorá je jednou zo stálic na popredných priečkach výnosu za predaj MEMS zariadení [28]. LIS3DH má dynamicky voliteľný maximálny rozsah merania s ODR 1 až 5300 Hz. Self-test zariadenia poskytuje užívateľovi koncového zariadenia informáciu o funkčnosti senzoru. Senzor môže generovať signál na výstupoch pomocou dvoch nezávislých udalostí, ako je napr. voľný pád alebo detekcia pohybu zariadenia. Prahy a časovanie generátora prerušení sú plne programovateľné užívateľom počas behu senzora. LIS3DH má integrovaný 32 miestny FIFO zásobník, ktorý slúži používateľovi na uloženie hodnôt a na zmenšenie interakcie medzi procesorom a senzorom. Samotný senzor je dostupný v malom, tenkom plastovom púzdre typu LGA s teplotnou garanciou od -40 do +85°C. Parametre [29]:

- Napájacie napätie: 1,71-3,6V
- Nezávislé IO napájanie: 1,8V
- Odber do 2μA
- Dynamický výber rozsah merania ±2g/±4g/±8g/±16g
- Digitálne rozhranie I²C/SPI
- Rýchlosť prenosu dát 1Hz až 5,3kHz
- Šírka výstupu 16b
- 2 nezávislé programovateľné generátory prerušení (voľný pád, detekcia pohybu, ...)
- Orientácia pohybu 6D/4D
- Zabudovaný senzor teploty
- 32 miestny 16b široký FIFO zásobník
- Odolný šoku do 10000g
- Prevádzkový teplotný rozsah: -40 až 85°C
- Puzdro: LLGA 16 3x3x1.0mm

4.4 GNSS modul u-blox MAX-M8Q

Modul dokáže prijímať až tri GNSS systémy paralelne (GPS/Galileo s BeiDou alebo GLONASS). MAX-M8Q rozpoznáva viacero satelitných konštelácií naraz, vďaka tomu poskytuje presnú polohu aj v prípade príjmu slabého signálu. Pre presnejšie a rýchlejšie merania polohy modul podporuje služby systémov QZSS, IMES, WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN. Modul ďalej poskytuje detekciu premiestnenia zariadenia od danej polohy (angl. geo-fencing), detekciu podvrhnutých signálov GNSS, konfigurovateľné rozhranie a rôzne GNSS asistencie Assist Now [30].

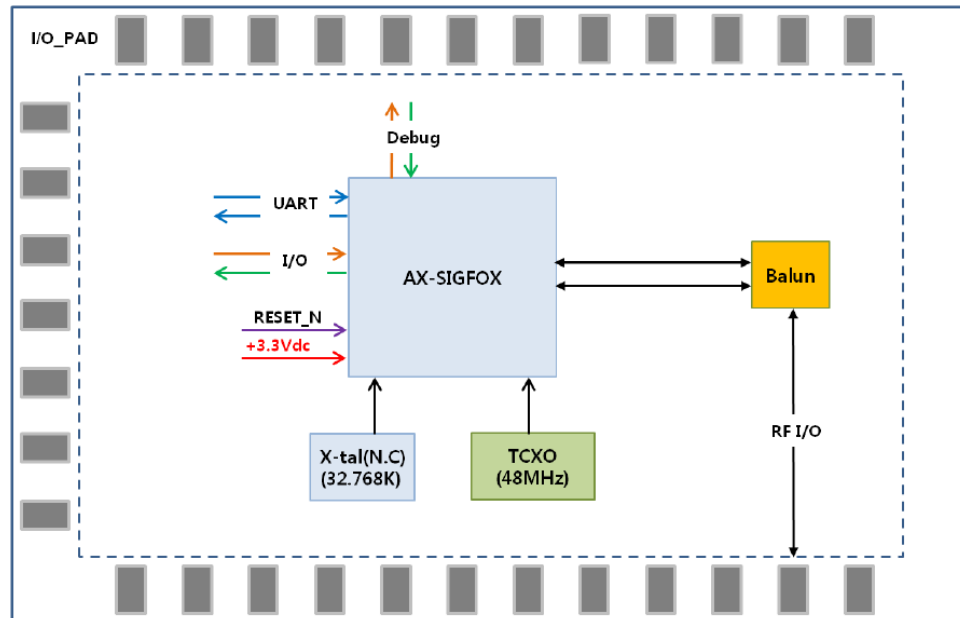
Parametre [31]:

- Napájacie napätie 2,7 V až 3,6 V
- Podporované GNSS: GPS, QZSS, GLONASS, Galileo, BeiDou
- Počet konkurenčných GNSS paralelne: 3
- Rozhranie: UART, DDC (kompatibilné s I²C)
- Komunikačný protokol UBX, NMEA
- Externá anténa, možnosť aktívnej/pasívnej antény
- 72 príjmových kanálov: GPS L1 C/A, SBAS L1/ CA, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1 OF, BeiDou B1I, Galileo E1 b/c
- 72 príjmových kanálov: GPS L1 C/A, SBAS L1/ CA, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1 OF, BeiDou B1I, Galileo E1 b/c
- Prevádzkové limity:
 - preťaženie 4g
 - nadmorská výška 50 km
 - rýchlosť 500 m/s
 - teplota -40 °C až 85 °C
- Odber pri určovaní polohy 20 mA na 3 V
- Rozmer modulu 10x9,7x2,5 mm

4.5 Rádiový modul Wissol WSSF10R1

Modul sprostredkováva pripojenie do siete SigFox v zóne č.1 (RCZ1), t. j. v EU. Interne obsahuje modul vysokofrekvenčnú časť spolu s procesorom, ktorý sa stará o šifrovanie a obecné o celý dátový prenos. Konkrétne sa jedná o procesor AX8052F143 (modifikácia procesora Intel 8051) od firmy OnSemi pod menom AX-SFEU (SFEU-SigFox Europe).

Meno označuje produkt pripravený na priame implementovanie do užívateľského zariadenia, s ktorým bude modul komunikovať pomocou AT príkazov. Ďalej v module rádia nájdeme zdroje hodinového signálu pre vysokofrekvenčnú časť (48 MHz TXCO) a pre samotný procesor (32,768 kHz).



Obr. 6 Bloková schéma rádia Wisol [32].

Parametre [32]:

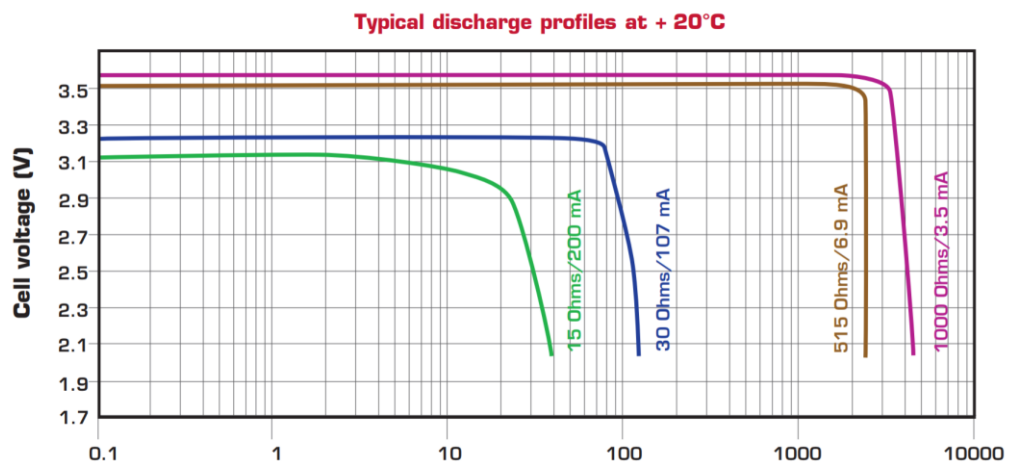
- Napájacie napätie 1,8 až 3,6 V, typicky 3,3 V
- Odber:
 - Vysielania - 65 mA
 - Príjem - 15 mA
 - Sleep mode - 2 μ A
- Vysielacia frekvencia 868,130 MHz
- Prijímacia frekvencia 869,525 MHz
- Vysielací výkon 12,5 až 15,5 dBm, typicky 13,5 dBm
- Prijímacia citlivosť -127 dBm
- Rozmery modulu 13x15x2,2 mm
- Teplota -30 až 85 °C

4.6 Batéria LS33600CNR

Lítiová 3V6 batéria (Li-SOCl₂) s kapacitou 17 Ah od firmy Saft. Jej výhodou je veľmi nízke samo-vybíjanie (menej ako 1% po jednom roku pri skladovacej teplote 20 °C).

Parametre [33]:

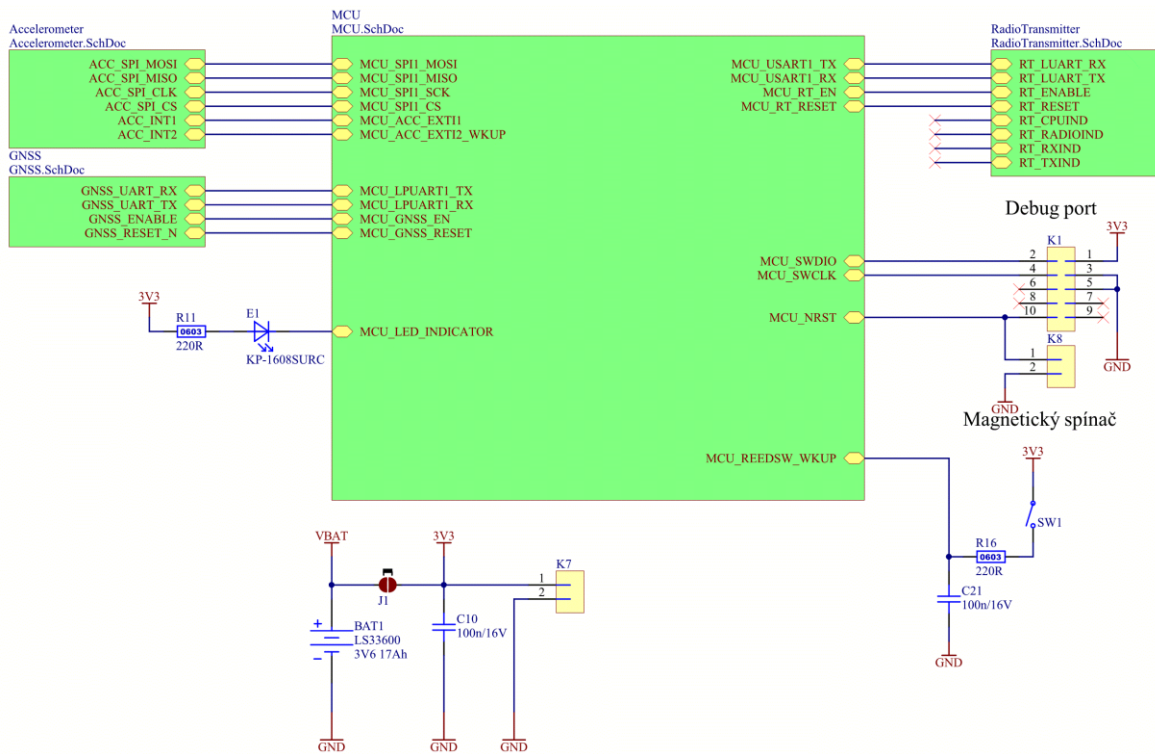
- Nominálne napätie 3V6 (@0,7 mA, 20 °C)
- Nominálna kapacita 17,0 Ah
- Nominálna energia 61,2 Wh
- Maximálny špičkový odber 400 mA
- Odporúčaný odber 250 mA
- Rozmery 33,4x62 mm
- Teplota -60 až 85°C



Graf 1 Samo-vybíjanie batérie pri 20°C [33].

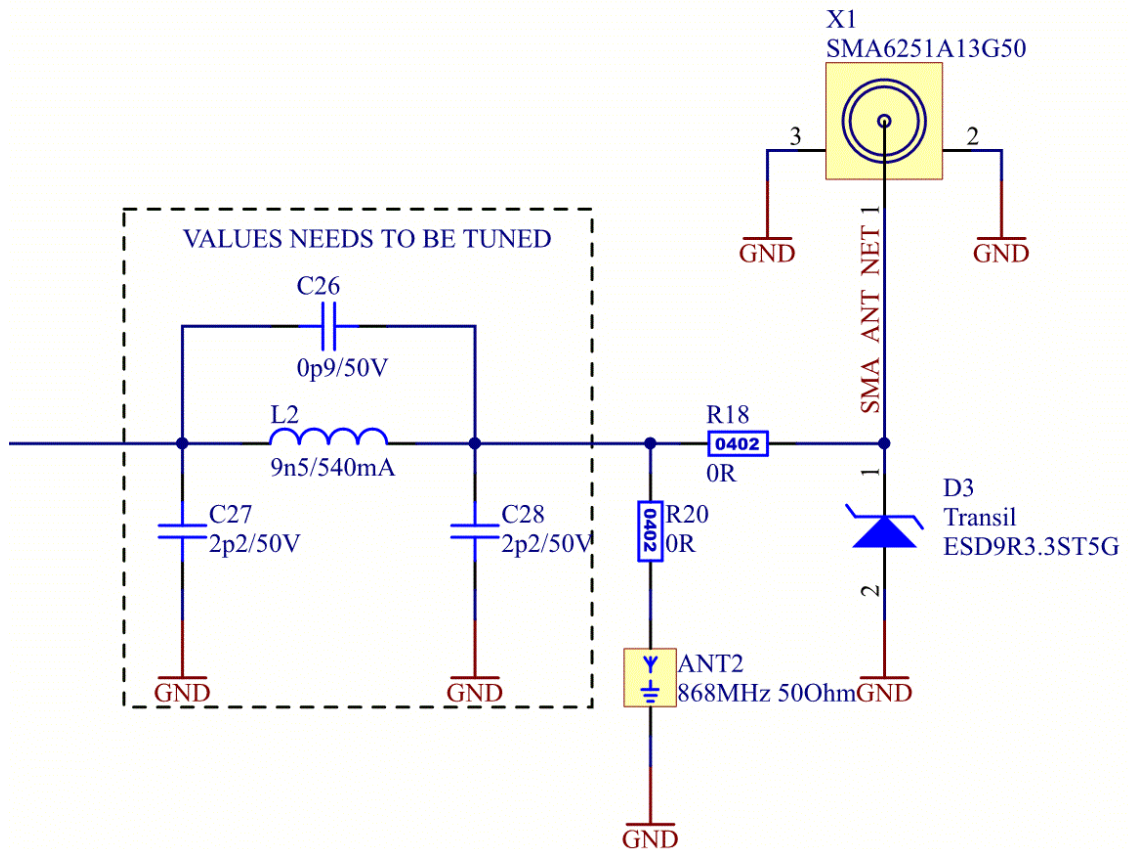
5 SCHÉMA DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV

Na obrázku vidíme abstraktnú blokovú schému, obsahujúcu bloky akcelerometera, GNSS, rádia, MCU a dodatočné hardvérové zapojenia určené na komunikáciu, signalizáciu a iné. Tieto bloky sú prepojené pomocou predom určeného rozhrania (napr. UART, SPI, ...). Bloky GNSS a rádia majú dodatočné riadiace signály, označené prefixom `_ENABLE`, pomocou ktorých vypíname modulom napájanie.



Obr. 7 Bloková schéma zariadenia.

Jednotlivé blokové schémy obsahujú modul s referenčným zapojením. Referenčné zapojenia modulov sú dostupné na stránkach výrobcov [29 s. 20] [34 s. 13] [35 s. 57] [32]. Vzhľadom na ich triviálnosť ich nebudeme uvádzať. Malou výnimkou je zapojenie antény, ktoré sme doplnili o impedančné prispôsobenie vo forme P siete. Toto prispôsobenie má po naladení negovať deformáciu parametrov antény, ktoré vzniknú pri jej zaobalení do plastového obalu zariadenia, alebo pri zmene veľkosti spodnej zemniacej vrstvy antény.



Obr. 8 Zapojenie rádiovkej antény.

P sieť je vyznačená prerušovanou čiarou. Napis „Hodnoty musia byť naladené“ (VALUES NEEDS TO BE TUNED) značia, že samotné hodnoty súčiastok C26, C27, C28, L2 sú iba orientačné. Samotné zapojenie je funkčné aj bez tejto siete, ale jej naladením dosiahneme maximálny výkon antény.

6 NÁVRH DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV

Doska plošných spojov je vyrobená z materiálu FR-4 s dvoma vrstvami medi a je určená na jednostrannú montáž súčiastok. Výnimkou tohto pravidla je batéria, ktorá bola umiestnená zo spodnej časti DPS. Majorita pasívnych súčiastok je veľkosti 0603. Hlavným dôvodom je samotné zadanie, ktoré definuje produkt s minimálnou veľkosťou. Vo vysokofrekvenčných obvodoch sme minimalizovali kapacitné a indukčné parazitné javy súčiastok použitím menších puzdier veľkosti 0402.

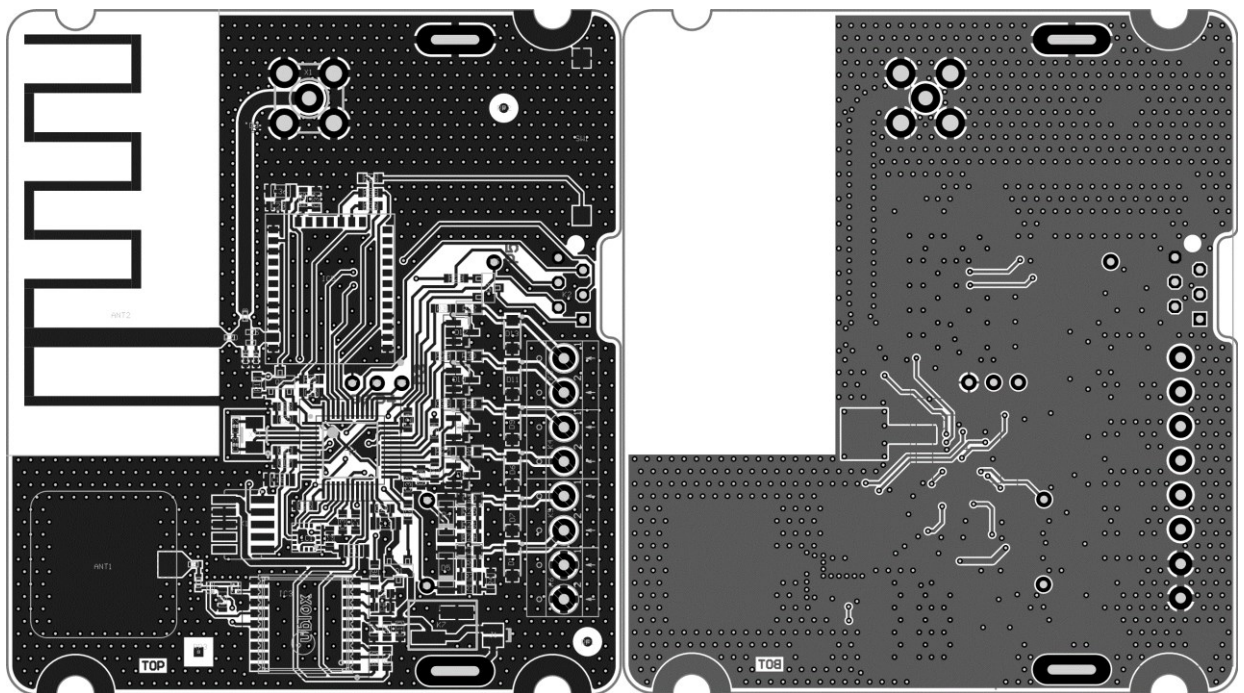
Pri návrhu dosky plošných spojov sme sa riadili všeobecnými pravidlami [34], ktoré definujú veľkosť a pozíciu pasívnych komponentov voči vstupu, resp. výstupu signálu, parametre plošných spojov RF časti DPS [35] a špecifickými pravidlami integrácie modulov, ktoré sú určené výrobcom.

6.1 Doska plošných spojov

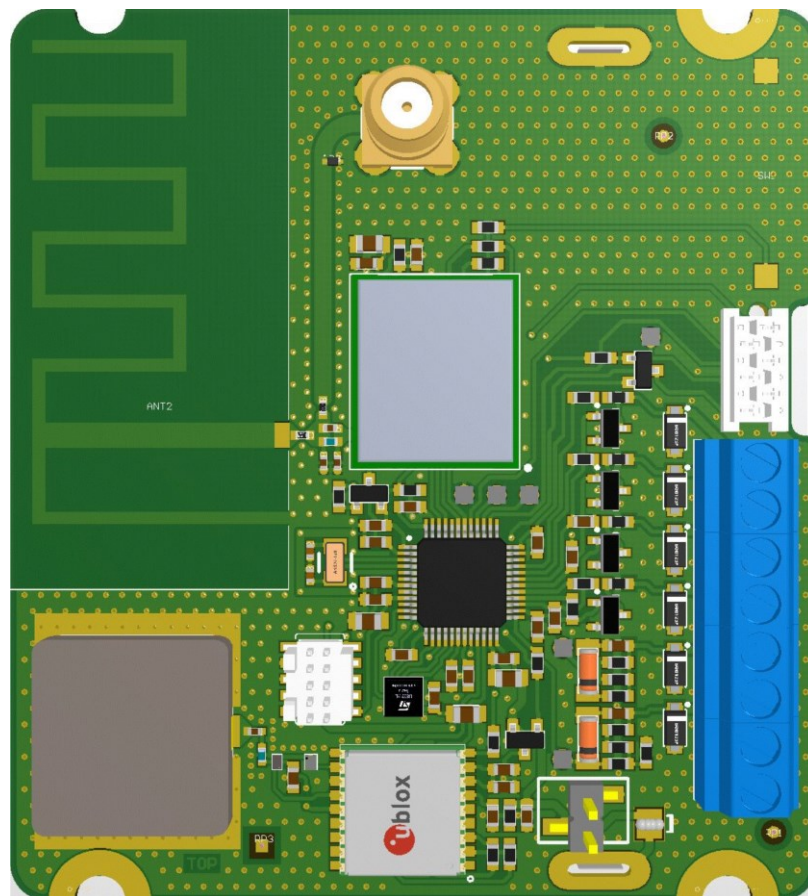
Doska plošných spojov splňuje konštrukčnú kategóriu č. 5. Konštrukčná kategória je vymedzená výrobcom, ktorý je v našom prípade firma Gatema. Výrobné limity sú:

- minimálna šírka vodiča: 0,20 mm
- minimálna šírka medzery medzi vodičmi: 0,20 mm
- minimálny presah plochy na polomer: 0,15 mm
- najmenší priemer vrtáku: 0,20 mm

Na obrázkoch nižšie (Obr. 9, Obr. 10) môžeme vidieť 2D a 3D návrh funkčného vzorku s rozmermi 70x63 mm.



Obr. 9 2D návrh funkčního vzorku (vrch, spod).






Obr. 10 3D návrh funkčního vzorku.

6.1.1 Anténa SigFox modulu

Z rôznych typov antén sme vybrali a použili DPS anténu, ktorá je tvorená medenou vrstvou na doske. Antény tohto typu majú veľkú výhodu oproti ostatným a to tú, že sú integrované priamo na dosku plošných spojov. Táto integrácia po základom naladení antény zníži cenu antény na výrobné náklady samotného DPS.

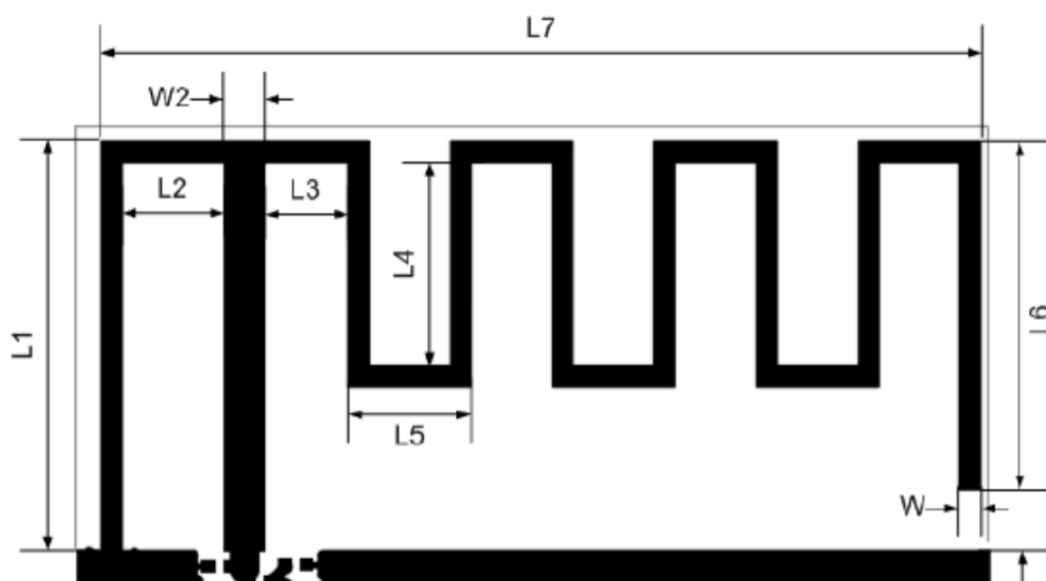
Z mnohých druhov DPS antén [36] sme zúžili náš výber na tri, a to na monopólnu [37], meandrovanú invertovanú F [38] a helickú [39] anténu.

			
Design / Application Note	DN024 *1	DN023	DN038 *2
Frequency	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz
Typical Efficiency	64%(EB) 98%(SA)	80%(SA)	66%(EB)
Bandwidth @ VSWR 2:0	88 MHz (SA)	40 MHz	40 MHz
Dimensions (mm)	38 x 25	43 x 20	19 x 12

Obr. 11 monopólna, meandrovaná invertovaná F, helická anténa [36]

Helická anténa (DN038) je rozmerovo najmenšia, nevýhodou je jej malá účinnosť, zameraná na vývojovej doske (EB, Evaluation board) a nutnosť prispôbovacieho obvodu (anténa nemá impedanciu 50 Ω). Prispôbenie impedancie antény by zvýšilo náklady na výrobu o pasívne súčiastky P siete a samotné hodnoty súčiastok siete by bolo problematické, až nereálne určiť na dostupných laboratórnych meracích zariadeniach. Zo zvyšných antén sme vybrali anténu DN023 (IFA), ktorá má menší rozmer šírky, ktorá bola pre nás pri návrhu kritická. V porovnaní efektivity s konkurentom je vyhovujúca a jej frekvenčné ladenie je realizované jednoduchým skrátením dĺžky antény.

DPS antény majú presne definovaný tvar, rozmery a pravidlá ich integrácie. Pri použití by sa malo dbať na umiestnenie a odstup ďalších častí obvodu a súčiastok DPS.



Obr. 12 Rozměry IFA (DN023) [38].

Tab. 1 Rozměry IFA
(DN023) [38].

Rozměr	d [mm]
$L1$	20,0
$L2$	5,0
$L3$	4,0
$L4$	10,0
$L5$	6,0
$L6$	17,0
$L7$	43,0
W	1,0
$W2$	2,0

7 SOFTVÉR ZARIADENIA

Aby boli zadané požiadavky na zariadenie splnené, musia byť odzrkadlené aj v softvérovom návrhu aplikácie. Toto tvrdenie sa týka najmä energetickej spotreby zariadenia, kde sme mali za cieľ obmedziť dobu jednotlivých modulov v aktívnom stave. Samotný procesor vyhodnocujúci dáta nazbierané z modulov, má stráviť majoritu času v móde s nízkym odberom a reagovať buď na periodické udalosti (ako napr. denná správa), alebo na udalosti akcelerometra. Akcelerometer má byť v stave nízkeho odberu a generovať prerušenia na výstupoch pri prekročení akcelerácie v jednej z troch os. Parametre, napr. prah, dĺžka, výstup, tohto prerušenia sú plne programovateľné užívateľom.

Aplikácia je implementovaná v programovacom jazyku C. V aplikácii používame operačný systém FreeRTOS. S jazykom a operačným systémom sa stručne zoznámime v ďalších podkapitolách.

7.1 Programovací jazyk C

C je programovací jazyk, ktorý počiatkom 70. rokov 20. storočia vyvinuli Ken Thompson a Dennis Ritchie pre potreby operačného systému Unix. V súčasnej dobe je to jeden z najrozšírenejších jazykov [40]. C je nízkoúrovňový, kompilovaný, relatívne minimalistický programovací jazyk. Je dostatočne mocný na väčšinu systémového programovania (ovládače a jadro OS), pričom zbytok ide doriešiť tzv. inline assemblerom, teda zápisom assembleru priamo do kódu. Zdrojový kód je pritom omnoho čitateľnejší ako assembler, je jednoduchší na zápis a navyše je ďaleko prenositeľnejší na iné procesory a počítačové architektúry. Preto sú často operačné systémy, prekladače, knižnice a interpretery vysokoúrovňových jazykov implementované práve v C. Mnoho ďalších moderných programovacích jazykov preberá spôsob zápisu (syntax) z jazyka C, napríklad C++, Java, Perl a PHP [43].

7.2 FreeRTOS

FreeRTOS je real-time kernel operačného systému, určený pre embedded zariadenia. Bol vyvinutý Richardom Barrym okolo roku 2003. Následne bol vyvíjaný a udržiavaný firmou Real Time Engineers Ltd. Od roku 2017 spravuje FreeRTOS Amazon Web Services (AWS). FreeRTOS je navrhnutý tak, aby bol pamäťovo nenáročný a jednoduchý. Samotný kernel pozostáva z troch C súborov. Kód je napísaný v jazyku C aby bol čitateľný, ľahko prenositeľný a udržiateľný s nutnými výnimkami napísanými v assembleru (väčšinu v architektúrou špecifických rutinách plánovača). Poskytuje metódy na implementovanie viacerých taskov

(spolu s prioritou obsluhy), mutexov, semaforov a softvérových časovačov. Tieto softvérové časovače neobsahujú premenné, ktoré sa interne inkrementujú, preto sú veľmi efektívne a využívajú procesorový čas iba na ich samotné spracovanie. Rovnaký princíp platí pre čakajúce a blokujúce tasky. FreeRTOS implementuje viacero taskov pomocou pravidelného hodinového signálu, ktorý je vyvolávaný hardvérovým časovačom zariadenie. Jeho perióda je zvyčajne 1 ms a po každom vyvolanom prerušení, program vykoná tick metódu, ktorá vyvoláva kontext switch úloh na základe priorit a plánovacieho algoritmu round-robin (RR). Počas spánku sme schopný toto prerušenie potlačiť a výrazne zredukovať spotrebu procesora. Múd OS pracujúci v režime potlačujúcom hodinové prerušenie sa nazýva „tick-less“ [42] [45].

V našej aplikácii používame FreeRTOS v tick-less móde, s čisto statickou alokáciou. Plánovač pracuje v kooperačnom režime. Tasky majú priradenú prioritu od -3 (idle) po +3 (real-time). Prerušenie hodinového signálu je nastavené na periódu 1 ms.

7.2.1 Statické vytvorenie tasku

Vytvorenie tasku budeme demonštrovať pseudo-kódom, pomocou ktorého vytvoríme task s názvom TaskA. Bude mať normálnu prioritu a zásobník veľký 64 B.

```
/* definícia a vytvorenie tasku */  
osThreadStaticDef( TaskA, TaskA_Function, osPriorityNormal, 0,  
                  64, TaskA_buffer, &TaskA_control_block );  
TaskA_handle = osThreadCreate( osThread( TaskA ), NULL );
```

Funkcia TaskA_Function predstavuje samotný task operačného systému. Jej deklarácia je:
`void TaskA_Function(void const* argument);`

7.2.2 Definovanie činnosti taskov

Tasky sú navrhnuté a vytvorené tak, aby spĺňali jednu konkrétnu funkciu. Prístupy k perifériám a modulom sú riešené pomocou gatekeeperov. Gatekeeper je task, ktorý má exkluzívny prístup k určitému zdroju. Ak chce aplikačný task dáta z periférií, musí poslať dotaz gatekeeperovi danej periférie. Tieto tasky majú vysokú prioritu, aby dokázali rýchlo reagovať na dotazy aplikačných taskov.

Z textu vyššie vyplýva, že máme dva druhy taskov a to:

- Gatekeeper task – exkluzívny prístup k zdrojom
- Aplikačný task – logika aplikácie

Základnou podmienkou dizajnu taskov je vysoká responzivnosť na dotazy ostatných taskov, pomocou ktorých tasky interne komunikujú. Táto podmienka je splnená implementáciou taskov ako neblokujúcich stavových automatov, ktoré aktívne čakajú na nové správy z okolia. Gatekeeper tasky ďalej implementujú funkcie potrebné na overenie hardvéru, poprípade komunikačného rozhrania periférneho modulu.

Na základe potrieb aplikácie sme definovali tieto tasky:

- task akcelerometra (gatekeeper)
- task GNSS modulu (gatekeeper)
- task rádiového modulu (gatekeeper)
- task aplikácie
- kontrolný task (kvázi aplikačný)
- servisný task (kvázi aplikačný)

V nasledujúcich podkapitolách definujeme úlohu jednotlivých taskov a ich činnosť.

7.2.2.1 Task akcelerometra – *acc_task*

Jedná sa o gatekeeper task obsluhujúci periférny modul akcelerometra. Má za úlohu inicializovať akcelerometer na žiadosť kontrolného tasku.

Na základe dotazu o poskytnutie dát akcelerometra, vyčítava dáta akcelerácie v tzv. “bulk” režime. Tento režim umožňuje ukladať dáta do internej pamäte akcelerometra. Pri dosiahnutí nastaveného počtu vzorkou, vyvolá akcelerometer externé prerušenie procesora. Task zareaguje na prerušenie vyčítaním všetkých uložených dát v pamäti akcelerometra. Dáta následne spracuje a uloží do patričnej globálnej premennej, ktorá je prístupná všetkým taskom.

Tento task je výnimočný v tom, že periféria ktorú obsluhuje je spúšťačom činnosti zariadenia. Aktívne spracováva prerušenie generované pri prekročení kritickej akcelerácie a prebúdzajú spiace tasky.

7.2.2.2 Task GNSS modulu – *gps_task*

Jedná sa o gatekeeper task obsluhujúci periférny modul GNSS. Na základe prijatého dotazu o poskytnutie polohy, task vykoná nasledovné:

- zapne napájanie GNSS modulu
- inicializuje modul (nastavenie rozhrania, protokolu , GNSS, ANA, ...)
- nastaví UTC čas modulu pomocou RTC

- uloží navigačnú databázu do GNSS modulu
- čaká na GPS fix po dobu TFF

Po fixácii polohy task aktualizuje svoju navigačnú databázu a v prípade platného fixu, aktualizuje čas RTC a následne modul vypína.

Task pri získavaní GPS polohy blokuje stavový automat, čím porušuje predom zadané pravidlá návrhu. Implementovať ho ako neblokujúci automat by bolo náročne a malo by veľmi malý dopad na funkčnosť aplikácie.

7.2.2.3 Task rádiového modulu – *radio_task*

Gatekeeper task rádia, poskytujúceho pripojenie do siete SigFox. Na rozdiel od zvyšných GK, task neimplementuje inicializáciu modulu (dôvodom je absencia parametrov, nutných inicializovať). Jeho úlohou je sprostredkovať možnosti overenia výkonu antény, v testovacej EMC komore a poslanie správy po sieti SigFox.

7.2.2.4 Task aplikácie – *app_task*

Aplikačný task, ktorý by potencionálne vykonával funkciu zadanú zákazníkom.

7.2.2.5 Ovládací task – *control_task*

Ovládací task preberá zodpovednosť start up-u aplikácie. Spúšťa postupne tasky v poradí:

1. Servisný task
2. GK tasky
3. Aplikačný task

Počas start up-u spustí kontrolu periférií, vyhodnotí výsledky kontroly a patrične zareaguje. V prípade potreby môže jednotlivé tasky deaktivovať alebo reštartovať.

7.2.2.6 Servisný task – *servis_task*

Servisný task, tak ako jeho meno napovedá, slúži na servisné účely. To zahŕňa zmenu a zobrazenie nastavení zariadenia (napr. prahy, periódy, ...), zobrazenia runtime dát a prepnutia zariadenia do testovacieho režimu. Výhodou je možnosť zmeny parametrov zariadenia, bez zmeny samotného binárneho kódu. Spustenie tasku je podmienené prvotnému štartu aplikácie. V ostatných prípadoch sa task spolu s jeho komunikačným rozhraním zablokuje.

7.2.3 Interná komunikácia úloh

Tasky spolu interne komunikujú pomocou queue. Každý task má vstupnú a výstupnú queue. Ich dĺžka je volená tak aby nenastalo ich zahltenie (overflow).

Komunikácia začína vytvorením samotnej správy, ktorú chceme odoslať. Táto správa ma pevný formát v podobe štruktúry:

```
typedef struct {
    TM_MessageDirection_t    TM_DIRECTION;
    QueueHandle_t            TM_SOURCE;
    TM_MessageType_t        TM_MESSAGE_TYPE;
} __attribute__((packed, aligned(1))) TM_Message_t;
```

Enumerácia TM_DIRECTION značí smer správy (dotaz/odpoveď/iné), TM_SOURCE je pointer na queue handler odosielateľa správy a TM_MESSAGE_TYPE určuje typ správy. Správa neobsahuje dátovú časť (tzv. payload) hlavne z dôvodu minimalizácie veľkosti správy. Ďalším dôvodom by bola duplicita, ktorá by takouto implementáciou vznikala (správa by obsahovala dáta, ktoré by sme kopírovali do globálne dostupného registra).

Minimalizácia veľkosti správy je kritická. S jej veľkosťou lineárne narastá pamäťová náročnosť programu, pretože queue fungujú na princípe „pass by value“. To znamená, že pri každom vložení správy do queue sa táto správa skopíruje. Ak vytvoríme queue správ o veľkosti n , zaberieme miesto $n * sizeof(TM_Message_t)[B]$. Pamäťová náročnosť je vykompenzovaná veľkou flexibilitou a rozšíriteľnosťou tohto riešenia.

Ďalším krokom bude samotné spracovanie správy adresátom, ktorý čaká na vstupnej queue príchod správy.

7.2.3.1 Ukážka internej komunikácie

V nasledujúcej ukážke pseudo-kódu vytvoríme dva tasky so vstupnou a výstupnou queue. Na taskoch budeme demonštrovať princíp komunikácie odoslaním správy od tasku A do tasku B.

```

/* Definícia a vytvorenie taskov */
osThreadStaticDef( TaskA, TaskAFunction, osPriorityHigh,
                  0, TASK_STACK_SIZE, TaskA_buffer,
                  &TaskA_control_block );

TaskA_handle = osThreadCreate( osThread( TaskA ), NULL );

osThreadStaticDef( TaskB, TaskBFunction, osPriorityHigh,
                  0, TASK_STACK_SIZE, TaskB_buffer,
                  &TaskB_control_block );

TaskB_handle = osThreadCreate( osThread( TaskB ), NULL );

/* Definícia a vytvorenie queue */
osMessageQStaticDef( TaskA_que, BP_QUE_LENGTH,
                    TM_Message_t, TaskA_queue_buffer,
                    &TaskA_queue_control_block );

TaskA_que_handle = osMessageCreate( osMessageQ( TaskA_que ),
                                   NULL );

osMessageQStaticDef( TaskB_que, BP_QUE_LENGTH,
                    TM_Message_t, TaskB_queue_buffer,
                    &TaskB_queue_control_block );

TaskB_que_handle = osMessageCreate( osMessageQ( TaskB_que ),
                                   NULL );

.
.
.
// Task A
// Vytvorenie a odoslanie správy z Tasku A do Tasku B
TM_Message_t message;
message.TM_DIRECTION = TM_REQUEST;
message.TM_MESSAGE_TYPE = TM_DUMMY_MSG;
message.TM_SOURCE = TaskA_que_handle;
TM_SendMessage( TaskB_que_handle, &message, 0 );

// Task B
// Nekonečný cyklus prijímutia správy
TM_Message_t message;

for( ;; ) {
    TM_ReceiveMessage( TaskB_que_handle, &message, UINT32_MAX );

    if(message.TM_SOURCE == TaskA_que_handle) {
        // reaguj na správu
    }
}

```

7.2.4 Presmerovanie zdroja prerušenia do taskov

Dôležitou úlohou komunikácie je výmena dát medzi perifériami samotného procesora a taskov. Príkladom je vyvolané externé prerušenie akcelerometra, ktoré by malo informovať task o pohybe. Komunikácia využíva vyššie popísané správy, ktoré sú zviazané dodatočnou štruktúrou k priradenému tasku.


```
u8_t LIS3DH_WriteReg( u8_t WriteAddr, u8_t Data )
{
    u8_t retVal = 0;

    HAL_GPIO_WritePin( MCU_SPI1_CS_GPIO_Port,
                      MCU_SPI1_CS_Pin, GPIO_PIN_RESET );

    if( ( HAL_SPI_Transmit( &hspi1, &WriteAddr,
                          1, 500 ) == HAL_OK ) &&
        ( HAL_SPI_Transmit( &hspi1, &Data,
                          1, 500 ) == HAL_OK ) ) {
        retVal = 1;
    }

    HAL_GPIO_WritePin( MCU_SPI1_CS_GPIO_Port,
                      MCU_SPI1_CS_Pin, GPIO_PIN_SET );

    return retVal;
}
```

Nad touto nízko úrovňovou knižnicou som vytvoril knižnicu acc. Táto knižnica implementuje základné prostriedky na spracovanie surových dát z akcelerometra, t. j. aplikácia LP filtra, vypočítanie náklonu, sféry gravitačného vektora a relatívne natočenie zariadenia.

```

// Essential functions
void ACC_SetSPI( KSPI_Spi_t* spi );
ACC_Status_t ACC_Init( LIS3DH_Fullscale_t fullscale,
                      uint8_t threshold,
                      LIS3DH_Int1Conf_t thresholdDuration );
ACC_Status_t ACC_GetInterrupt1( bool* flag );
ACC_Status_t ACC_GetInterrupt2( bool* flag );
ACC_Status_t ACC_GetSensitivity( double* sensitivity );

// Axes data manipulation
ACC_Status_t ACC_GetSector( ACC_RawData_t* data,
                           ACC_Sector_t* sector );
ACC_Status_t ACC_RotateBySector( ACC_RawData_t* data,
                                 ACC_Sector_t sector );
void ACC_RescaleRawData( ACC_RawData_t* rawData,
                       ACC_RawData_t* rescaledData,
                       double sensitivity );
void ACC_LowPassFilter( ACC_RawData_t* oldData,
                      ACC_RawData_t* newData );

// Reading functions
ACC_Status_t ACC_GetAxesData( ACC_RawData_t* data,
                              double sensitivity, bool lpFilter );
ACC_Status_t ACC_StartFifo( uint8_t waterMark );
ACC_Status_t ACC_StopFifo( void );
ACC_Status_t ACC_ReadFifoData( ACC_RawData_t* data, uint8_t samples,
                              double sensitivity, bool lpFilter );

// Calculating functions
ACC_Status_t ACC_CalAngle( int16_t a, int16_t b,
                          int16_t c, int16_t* angle );
ACC_Status_t ACC_CalPitch( ACC_RawData_t* data, int16_t* angle );
ACC_Status_t ACC_CalRoll( ACC_RawData_t* data, int16_t* angle );
ACC_Status_t ACC_CalTilt( ACC_RawData_t* data, ACC_Tilt_t* tilt );
ACC_Status_t ACC_CalAngles( ACC_RawData_t* data,
                           ACC_TiltAngles_t* angles,
                           ACC_TiltAngles_t offsetAngles );

// Rescaling functions
ACC_Status_t ACC_RescaleAngle( int16_t a, int16_t b, int16_t* angle );
ACC_Status_t ACC_RescalePitch( ACC_RawData_t* data, int16_t* angle );
ACC_Status_t ACC_RescaleRoll( ACC_RawData_t* data, int16_t* angle );

// Offset functions
ACC_Status_t ACC_OffsetAngle( int16_t* angle, int16_t offsetAngle );

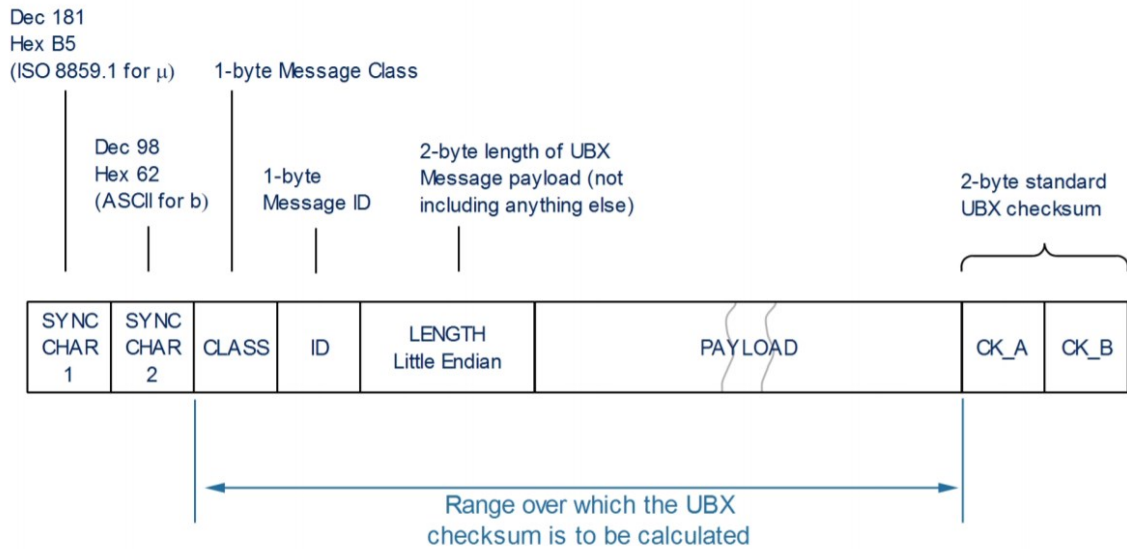
```

7.3.3 Knižnice GNSS modulu u-blox MAX-M8Q

Knižnica `ublox_ubx` je implementácia binárneho komunikačného protokolu UBX. Tento protokol slúži na nastavenie a na čítanie dát z u-blox GNSS modulu. Štruktúra rámca protokolu:

- Vždy začína synchronizačnými znakmi „ μ b“ (SYNC CHAR).
- Obsahuje 1 B údaj o type správy (CLASS).
- Obsahuje 1 B údaj o ID správy (ID).

- Obsahuje 2 B údaj o délce správy (LENGTH).
- Obsahuje datovou část s promennou délkou (PAYLOAD).
- Obsahuje 2 B kontrolný checksum (CK_A, CK_B).



Obr. 13 Štruktúra rámca protokolu UBX [31].

Protokol som implementoval pomocou mapovania dát na štruktúry, ktoré odpovedajú 1:1 k prenášanej správe. Prvotne som vytvoril štruktúru hlavičky a záhlavia správy. Tieto štruktúry sú zhodné pre všetky prenášané UBX správy.

```

/*!< Header format is same for all UBX messages types. */
typedef struct {
    uint8_t          UBX_SYNC_CHAR[2];
    uint8_t          UBX_CLASS;
    uint8_t          UBX_ID;
    uint16_t         UBX_LENGTH;
} __attribute__((packed, aligned(1))) UBX_Header_t;

/*!< Checksum format is same for all UBX messages types. */
typedef struct {
    uint8_t          UBX_CK_A;
    uint8_t          UBX_CK_B;
} __attribute__((packed, aligned(1))) UBX_Checksum_t;

```

Na ukážku implementácie správy uvediem základnú ACK správu protokolu UBX. Správa obsahuje class-u a ID správy, ktorej potvrdzuje prijatie.

```

/*!< UBX-ACK-ACK */
typedef struct {
    UBX_Header_t    UBX_HEADER;
    // payload start
    uint8_t        UBX_CLS_ID;
    uint8_t        UBX_MSG_ID;
    // payload end
    UBX_Checksum_t UBX_CHECKSUM;
} __attribute__( ( packed, aligned( 1 ) ) )UBX_ACK_ACK_t;

```

Po vytvorení štruktúr správ som zaobalil logiku práce s GNSS modulom do uvedených funkcií:

```

/* Checksum funkcie */
UBX_Status_t UBX_CalChecksum( const uint8_t* message,
                             uint8_t messageLength, uint16_t* checksum );
UBX_Status_t UBX_CheckChecksum( const uint8_t* message,
                                uint8_t messageLength );
UBX_Status_t UBX_AddChecksum( uint8_t* message, uint8_t messageLength );

/* Naplnenie spravy ACK */
UBX_Status_t UBX_FillAckMsg( const uint8_t* messageToAck,
                             UBX_ACK_ACK_t* message );

/* Configuration messages */
UBX_Status_t UBX_SetCfgPrt( void );
UBX_Status_t UBX_SetCfgNavx5( void );
UBX_Status_t UBX_SetCfgGnss( void );
UBX_Status_t UBX_SetMgaIniTimeUTC( RTC_TimeTypeDef* sTime,
                                   RTC_DateTypeDef* sDate,
                                   bool* accepted );

/* Data messages */
UBX_Status_t UBX_GetNavPosllh( int32_t* longitude, int32_t* latitude );
UBX_Status_t UBX_GetNavStatus( UBX_GpsFix_t* gpsFix,
                               uint32_t* timeToFirstFix,
                               uint32_t* uptime );
UBX_Status_t UBX_GetNavAopstatus( bool* ANAisIdle );
UBX_Status_t UBX_GetNavTimeUTC( RTC_TimeTypeDef* sTime,
                                RTC_DateTypeDef* sDate,
                                bool* isValid );
UBX_Status_t UBX_GetMonHw( UBX_AntennaStatus_t* antennaStatus,
                           UBX_AntennaPower_t* antennaPower );

/* DB manipulation */
UBX_Status_t UBX_GetMgaDbd( void );
UBX_Status_t UBX_SetMgaDbd( void );

```

Nad knižnicou ublox_ubx som navrhol knižnicu gps. Táto knižnica oddeľuje vrstvu protokolu od logiky aplikačnej. Deklarujeme v nej nasledujúce funkcie:

```

void GPS_TurnOn( void );
void GPS_TurnOff( void );
void GPS_Reset( void );
bool GPS_isFixActual( uint32_t fixTimestamp, uint32_t time );
void GPS_SetUART( UART_HandleTypeDef* huart );
GPS_Status_t GPS_Init( void );
GPS_Status_t GPS_GetCoordinates( int32_t* longitude, int32_t* latitude,
                                UBX_GpsFix_t* gpsFix );
GPS_Status_t GPS_GetTime( RTC_TimeTypeDef* sTime, RTC_DateTypeDef* sDate,
                          bool* isValid );
GPS_Status_t GPS_SetTime( RTC_TimeTypeDef* sTime, RTC_DateTypeDef* sDate,
                          bool* accepted );
GPS_Status_t GPS_GetAntennaStatus( UBX_AntennaStatus_t* antennaStatus,
                                   UBX_AntennaPower_t* antennaPower );

```

7.3.4 Knižnica rádiového modulu Wisol WSSFM10R1

Rádiový modul komunikuje pomocou AT príkazov. Tieto textové príkazy sú case sensitive. Začínajú reťazcom „AT“, za ktorým nasledujú parametre. Za parametrami je ukončovací znak v tvare akéhokoľvek bieleho znaku. Príklad AT príkazu:

```
AT$SF=frame[,bit].
```

Tento protokol implementujem v knižnici onsemi_at. Kde som vytvoril funkcie potrebné na odoslanie správy do siete SigFox, vid'. deklarácie funkcií knižnice:

```

OAT_Status_t OAT_IsAlive( bool* isAlive );
OAT_Status_t OAT_SendCW( const uint32_t freq, bool enableCarrierWave,
                        uint8_t power );
OAT_Status_t AXC_SendFrame( const uint8_t* txBuffer, uint8_t txSize,
                            uint8_t* rxBuffer, uint8_t rxSize,
                            const bool waitForResponse );

```

Aplikačná knižnica radio pracuje nad touto knižnicou. Umožňuje základnú prácu s rádiom, t. j. zapnutie, vypnutie modulu a poslanie správy. Vid'. deklarácie funkcií knižnice:

```

void RADIO_TurnOn( void );
void RADIO_TurnOff( void );
void RADIO_Reset( void );
void RADIO_SetUART( UART_HandleTypeDef* huart );
RADIO_Status_t RADIO_SendMessage( uint8_t message[12] );

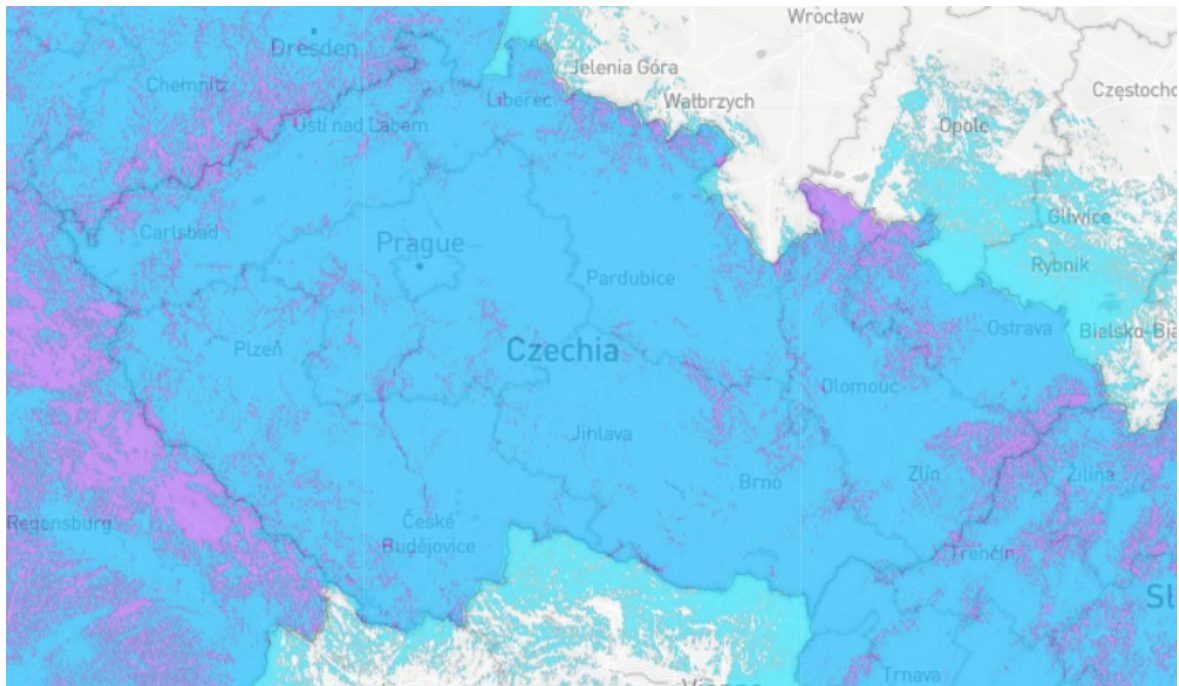
```


8 TESTY, OVERENIE FUNKČNOSTI

Základné testy funkčnosti som vykonal v kontrolovaných podmienkach. Tieto testy zahŕňali overenie zapojenia DPS a základne testy rozhraní modulov. Štatistické údaje som získal z údajov nazbieraných počas testovania v teréne. Na tieto testy bol napísaný aplikačný task, ktorý sleduje pohyb zariadenia. Po vyhodnotení pohybu zisťuje polohu a odosiela správy po sieti SigFox.

8.1 Test funkčnosti rádia

Najjednoduchším testom funkčnosti rádia je vyslanie testovacej správy do siete SigFox a potvrdenie jej prijatia na strane backend-u. Úspešnosť prijatia správy závisí aj od aktuálneho pokrytia siete.

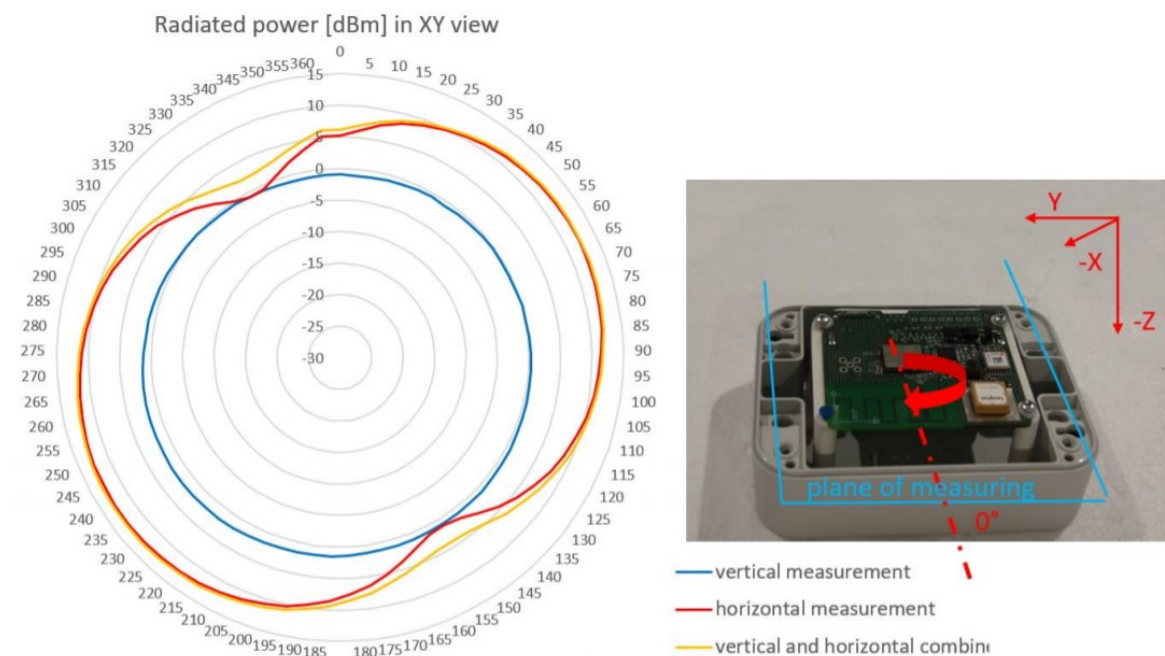


Obr. 14 Ilustračné pokrytie siete SigFox na území ČR [10].

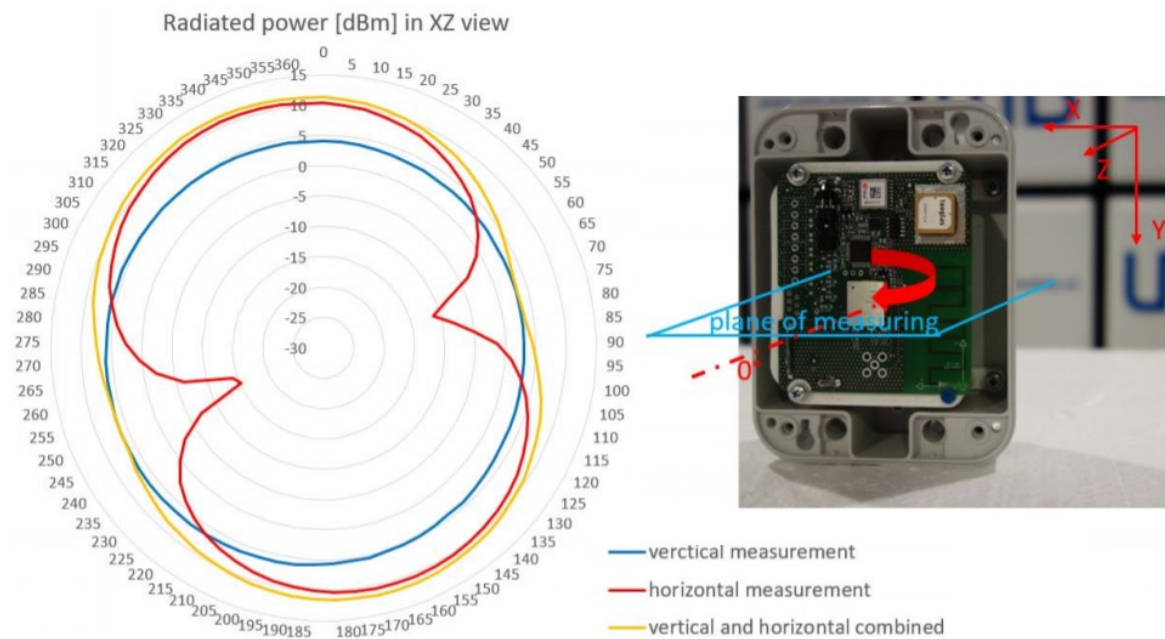
V kontrolovaných podmienkach odosielania, z adresy Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín, mám úspešnosť prijatia správy 100%. V teréne v okolí Zlína a Brna sme prijali na backend iba 76 z 87 správ (t. j. 87%). Predpokladáme, že za nízku úspešnosť môže samotný modul rádia a backend, ktorým správy vyhodnocujeme.

8.1.1 Vyžarovacia charakteristika antény rádiového modulu

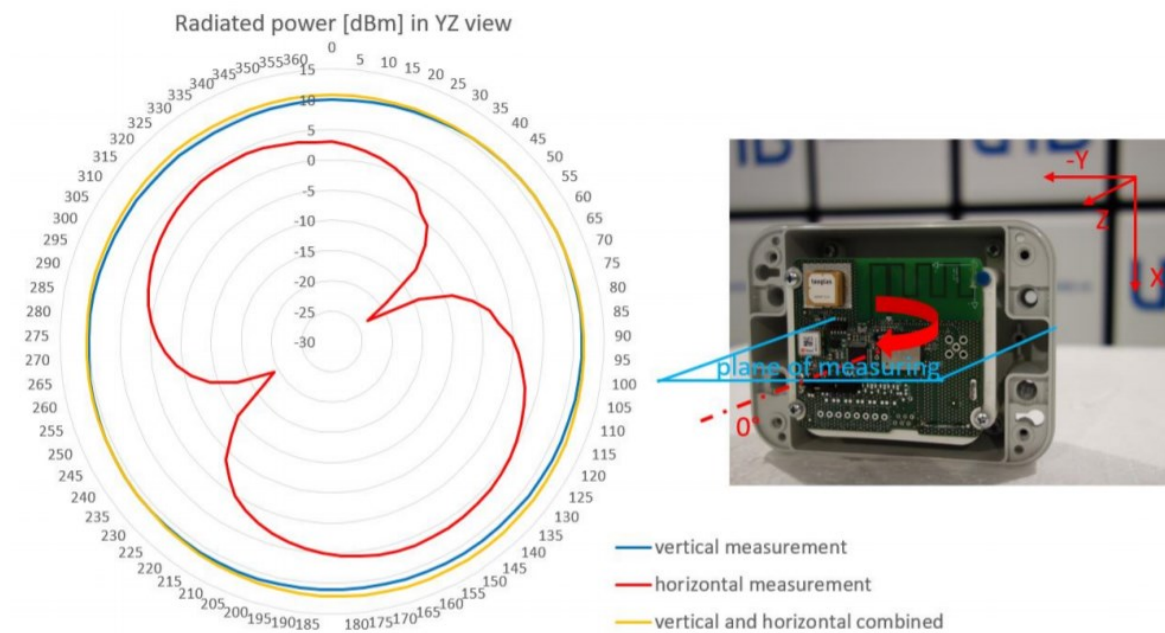
Pri výbere a návrhu antény sa riadime aj charakterom vyžarovania antény, resp. jej smerovosťou. Charakteristiky uvedené výrobcom alebo výrobným manuálom (v prípade DPS antény) často neodpovedajú charakteristike antény v reálnom zariadení. Rozdiel charakteristík je spôsobený deformáciou, ktorá je spôsobená neoptimálnym umiestnením antény, nedodržaním pravidiel implementácie alebo samotným obalom zariadenia. Preto sme vyžarovacie charakteristiky zmerali v EMC komore. Počas testu vyžarovania, rádio neustále vysiela nosnú vlnu na frekvencii 868,5 MHz. Zmerané vyžarovacie charakteristiky antény sú uvedené nižšie:



Obr. 15 Vyžarovacia charakteristika v smere XY.



Obr. 16 Vyžarovacia charakteristika v smere XZ.



Obr. 17 Vyžarovacia charakteristika v smere YZ.

Zariadenie sa výsledkami umiestňuje do kategórie class 0u. Teda do najvyššej vyžarovacej kategórie zariadení SigFox.

8.2 Test modulu GNSS

Hardvérové zapojenie antény som overil pomocou samotného GNSS modulu, ktorý testuje zapojenie antény pri self-teste. Výsledky testu môžeme získať pomocou UBX protokolu.

Ďalším testom antény je určenie polohy zariadenia v kontrolovaných podmienkach a v teréne. Zariadenia testom v kontrolovaných podmienkach prešlo s priemerným časom TTF 8 minút. Test v teréne bol spustený paralelne s testom rádia. Priemerná doba určovania polohy bola 2 min a 8 sekúnd, pri 146 pokusoch o určenie polohy. Pri 12 pokusoch nebolo zariadenie schopné určiť polohu po 10 minútach (maximálny povolený čas).

8.3 Odber a životnosť zariadenia

Z testov zariadenia v teréne zistíme priemerný čas zapnutia jednotlivých modulov. Tieto údaje prevedieme do stavov, ktoré majú majoritný vplyv na odber zariadenia. Následne zmeriame odber zariadenia v týchto stavoch a určíme maximálnu prevádzkovú dobu zariadenia na jedno nabitie batérie.

Tab. 2 Vyhodnotenia odberu zariadenia.

Stav zariadenia	I [mA]	t_{on} [%]
Spánok	3,3015	97,56
Určovanie GPS polohy	27,5019	2,23
Vysielanie správ SigFox	37,2966	0,21

Kde I značí prúdový odber zariadenia a t_{on} čas strávený v danom stave v percentuálnom vyjadrení. Na základe výsledkov môžeme určiť, že prevádzková doba zariadenia, pri kapacite batérie 17 Ah je 6 mesiacov.

ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce oboznamujem čitateľa s pojmom IoT a niekoľkými jeho protokolmi a sieťami. Ďalej sa venujem problematike merania fyzikálnych veličín, ako je akcelerácia, náklon a zemepisná poloha.

V praktickej časti bakalárskej práce sa v prvom rade venujem výberu hardvérových komponentov, ktoré splňujú požiadavky našej aplikácie. Po tomto výbere som vytvoril schematický návrh dosky plošných spojov s minimalizovaným elektrickým odberom. Následne som pomocou schémy navrhol dosku plošných spojov funkčného vzorku zariadenia. Posledným krokom bolo zariadenie hardvérovo a softvérovo oživiť a otestovať. Testy zariadenia som vykonal v laboratórnych podmienkach a v teréne.

Všetky časti zariadenia sú plne funkčné po oboch stránkach návrhu. Zariadenie splňuje všetky nami stanovené podmienky, okrem životnosti batérie. Tento nedostatok je možné vo veľkej miere odstrániť pomocou optimalizácie spotreby zariadenia v spánkovom režime a zvýšenia stráveného času v tomto režime.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **STMicroelectronics**. Wireless connectivity for IoT applications. *st*. [Online] Október 2015. [Dátum: 17. Apríl 2018.] http://www.st.com/content/ccc/resource/sales_and_marketing/promotional_material/brochure/d7/74/dc/eb/b4/f5/40/d5/brwireless_web.pdf/files/brwireless_web.pdf/jcr:content/translations/en.brwireless_web.pdf.
2. **Nurzaman, Ahmed a Rahman, Hafizur a Md. Hussain, Iftekhar**. Internet of Things (IoT) Communication: Architecture, Standards and Protocol stacks. *authorea*. [Online] 25. August 2015. [Dátum: 17. Máj 2018.] https://www.authorea.com/users/54983/articles/65461-internet-of-things-iot-communication-architecture-standards-and-protocol-stacks/_show_article.
3. **iot-portal**. IQRF. *iot-portal*. [Online] 27. November 2017. [Dátum: 15. Apríl 2018.] <https://www.iot-portal.cz/2017/11/27/iqrf/>.
4. —. MiWi. *iot-portal*. [Online] 6. Máj 2016. [Dátum: 15. Apríl 2018.] <https://www.iot-portal.cz/2016/05/06/miwi/>.
5. **Microchip Technology**. Low-cost Embedded Wireless Connectivity for Commercial and Smart Home Networks. *microchip*. [Online] [Dátum: 15. Apríl 2018.] <https://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/embedded-wireless/802-15-4/software/miwi-protocol>.
6. **iot-portal**. NarrowBand IoT. *iot-portal*. [Online] 30. Apríl 2016. [Dátum: 15. Apríl 2018.] <https://www.iot-portal.cz/2016/04/30/narrowband-iot/>.
7. —. Wi-Fi HaLow. *iot-portal*. [Online] 29. Február 2016. [Dátum: 15. Apríl 2018.] <https://www.iot-portal.cz/2016/02/29/wi-fi-halow/>.
8. —. LoRaWAN. *iot-portal*. [Online] 29. Február 2016. [Dátum: 15. Apríl 2018.] <https://www.iot-portal.cz/2016/02/29/lorawan/>.
9. —. Sigfox. *iot-portal*. [Online] 26. Február 2016. [Dátum: 18. Apríl 2018.] <https://www.iot-portal.cz/2016/02/26/sigfox/>.
10. **SigFox**. Coverage. *sigfox*. [Online] [Dátum: 17. Máj 2018.] <https://www.sigfox.com/en/coverage>.

11. **iot-portal.** ZigBee. *iot-portal*. [Online] 24. Február 2016. [Dátum: 18. Apríl 2018.] <https://www.iot-portal.cz/2016/02/24/zigbee/>.
12. **Silicon Laboratories.** Learn. *z-wave*. [Online] 2018. [Dátum: 17. Máj 2018.] <http://www.z-wave.com/learn>.
13. **Wikipedia.** Z-Wave. *wikipedia*. [Online] Wikimedia Foundation, 18. Máj 2018. [Dátum: 19. Máj 2018.] <https://en.wikipedia.org/wiki/Z-Wavea>.
14. **Andrejašic, Matej.** MEMS ACCELEROMETERS. *mafija.fmf.uni-lj*. [Online] 10. Marec 2008. [Dátum: 23. Apríl 2018.] http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/MEMS_accelerometers-koncna.pdf.
15. **MNX.** What is MEMS Technology? *mems-exchange*. [Online] [Dátum: 17. Máj 2018.] <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>.
16. **STMicroelectronics.** AN4509 Application note. *st*. [Online] 10. Jún 2014. [Dátum: 23. Apríl 2018.] http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/d2/d6/22/4f/b9/8f/45/59/DM00119046.pdf/files/DM00119046.pdf/jcr:content/translations/en.DM00119046.pdf.
17. **National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing.** What is GPS? *gps.gov*. [Online] 6. Jún 2017. [Dátum: 17. Máj 2018.] <https://www.gps.gov/systems/gps/>.
18. —. Space Segment. *gps*. [Online] 6. Marec 2018. [Dátum: 6. Máj 2018.] <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>.
19. **RF.** GLONASS STATUS. *glonass-iac*. [Online] 17. Máj 2018. [Dátum: 17. Máj 2018.] <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>.
20. **Rapant, Peter.** Družicové polohové systémy. *researchgate*. [Online] 2002. [Dátum: 25. Apríl 2018.] https://www.researchgate.net/profile/Petr_Rapant/publication/310378256_Druzicove_pohove_systemy/links/582c467508ae138f1bf70cd3/Druzicove-pohove-systemy.pdf. ISBN 80-245-0124-8.
21. **Kornhauser, Alain L.** Global Navigation Satellite System (GNSS) . *princeton*. [Online] [Dátum: 17. Máj 2018.] <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>.

22. **Galileo GNSS.** Galileo Frequency bands. *galileognss*. [Online] 8. September 2013. [Datum: 17. Máj 2018.] <http://galileognss.eu/galileo-frequency-bands/>.
23. **Český kozmický portál.** GALILEO signály a přijímače. *czechspaceportal*. [Online] 2017. [Datum: 17. Máj 2018.] <http://www.czechspaceportal.cz/gnss-systemy/galileo/komponenty-systemu-galileo/galileo-signaly-a-prijimace/>.
24. **European Global Navigation Satellite Systems Agency.** Galileo Services. *gsa.europa*. [Online] 9. December 2016. [Datum: 17. Máj 2018.] <https://www.gsa.europa.eu/galileo/services>.
25. **Český kozmický portál.** GALILEO - poskytované služby. *czechspaceportal*. [Online] 2017. [Datum: 17. Máj 2018.] <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/galileo/galileo---poskytovane-sluzby/>.
26. **NovAtel.** An introduction to GNSS. *novatel*. [Online] [Datum: 17. Máj 2018.] <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-2-basic-gnss-concepts/step-2-propagation/>.
27. **STMicroelectronics.** STM32L073CZ. *st*. [Online] 2018. [Datum: 17. Máj 2018.] <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32l073cz.html>.
28. **Yole.** The MEMS industry: desperately seeking a second wind. *yole*. [Online] 5. Apríl 2016. [Datum: 23. Apríl 2018.] http://www.yole.fr/2015_TOP30_MEMS_Players.aspx#.Wt3fKYhuZPY.
29. **STMicroelectronics.** LIS3DH. *st*. [Online] 12. December 2016. [Datum: 23. Apríl 2018.] <http://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3dh.pdf>.
30. **u-blox.** MAX-M8 series. *u-blox*. [Online] [Datum: 17. Máj 2018.] <https://www.u-blox.com/en/product/max-m8-series>.
31. —. u-blox 8 / u-blox M8 Receiver Description. *u-blox*. [Online] 6. Marec 2018. [Datum: 17. Máj 2018.] https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_%28UBX-13003221%29_Public.pdf.
32. **WISOL.** WISOL / WSSFM10R1AT. *wissol*. [Online] [Datum: 17. Máj 2018.] <http://support.wisol.co.kr/en/>.

33. **Arthur Associates Limited.** Primary lithium battery LS 33600. *datasheet.ciiva*. [Online] Júl 2010. [Dátum: 17. Máj 2018.] <https://datasheet.ciiva.com/30460/0900766b812310c9-30460216.pdf>.
34. **u-blox.** MAX-8 / MAX-M8. *u-blox*. [Online] 6. Október 2017. [Dátum: 19. Máj 2018.] https://www.u-blox.com/sites/default/files/MAX-8-M8-FW3_HardwareIntegrationManual_%28UBX-15030059%29.pdf.
35. **STMicroelectronics.** STM32L073x8 STM32L073xB STM32L073xZ. *st*. [Online] 12. September 2017. [Dátum: 19. Máj 2018.] <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/d8/b3/7b/dc/18/22/44/f5/DM00141036.pdf/files/DM00141036.pdf/jcr:content/translations/en.DM00141036.pdf>.
36. **Čožík, Ing. Ondřej.** POUŽITÍ BLOKOVACÍCH KONDENZÁTORŮ PŘI NÁVRHU DPS. *slaboproudyobzor*. [Online] 2013. [Dátum: 17. Máj 2018.] <http://www.slaboproudyobzor.cz/files/20130308.pdf>.
37. **Pattnayak, Tapan a Thanikachalam, Guhapriyan.** AN91445. *cypress*. [Online] 9. August 2017. [Dátum: 17. Máj 2018.] <http://www.cypress.com/file/136236/download>.
38. **Texas Instruments.** Antenna Selection Quick Guide DN035. *ti*. [Online] 2013. [Dátum: 17. Máj 2018.] <http://www.ti.com/lit/an/swra351a/swra351a.pdf>.
39. **Wallace, Richard.** Design Note DN024. *ti*. [Online] 22. Február 2013. [Dátum: 17. Máj 2018.] <http://www.ti.com/lit/an/swra227e/swra227e.pdf>.
40. **Kervel, Fredrik.** Design Note DN023. *ti*. [Online] 30. August 2011. [Dátum: 17. Máj 2018.] <http://www.ti.com/lit/an/swra228c/swra228c.pdf>.
41. **Wallace, Richard.** Design Note DN038. *ti*. [Online] 27. November 2012. [Dátum: 17. Máj 2018.] <http://www.ti.com/lit/an/swra416/swra416.pdf>.
42. **Stack Exchange, Inc.** Developer Survey Results 2018. *insights.stackoverflow*. [Online] 2018. [Dátum: 17. Máj 2018.] <https://insights.stackoverflow.com/survey/2018/>.
43. **Wikipedia.** C (programovací jazyk). *wikipedia*. [Online] Wikimedia Foundation, 1. Január 2018. [Dátum: 19. Máj 2018.] [https://cs.wikipedia.org/wiki/C_\(programovac%C3%AD_jazyk\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/C_(programovac%C3%AD_jazyk)).

44. **Ltd, Real Time Engineers.** What is An RTOS? *freertos*. [Online] [Datum: 17. Máj 2018.] <https://www.freertos.org/about-RTOS.html>.
45. **Wikimedia.** FreeRTOS. *wikipedia*. [Online] Wikimedia Foundation, Máj 14, 2018. [Cited: Máj 19, 2018.] <https://en.wikipedia.org/wiki/FreeRTOS>.
46. **novatel-propagacia.** novatel-propagacia. *novatel-propagacia*. [Online] <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-2-basic-gnss-concepts/step-4-computation/>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ANA	AssistNow Autonomous.
CW	Carrier wave.
DPA	Direct Peripheral Access
ETSI	Európsky ústav pre telekomunikačné normy (European Telecommunications Standards Institute).
FCC	Federálna komisia pre komunikácie (Federal Communications Commission).
GK	Gatekeeper.
GNSS	Globálny družicový polohový systém (Global Navigation Satellite System).
GSM	Globálny systém mobilných komunikácií (Global System for Mobile Communications).
I ² C	Inter-Integrated Circuit.
IFA	Invertovaná F anténa (Inverted F Antenna).
IOT	Internet vecí (Internet of Things).
ISM	Pásmo pre obor priemyselný, vedecký, zdravotnícky (industrial, scientific and medical).
LPWA	Low-power sieť s veľkou rozlohou (Low-Power Wide-Area).
LTE	Technológia určená na vysokorýchlostný internet v mobilných sieťach (Long Term Evolution).
M2M	Stroj-stroj (Machine-to-machine).
MEMS	Mikro elektromechanické systémy (Micro Electro Mechanical Systems).
MIMO	Viacero vstupov, viacero výstupov (Multiple-Input and Multiple-Output).
ODR	Obnovovacia rýchlosť dát na výstupe (Output Data Rate).
PAN	Personal Area Network.
SoC	Systém na čipe (System on Chip).
SPI	Sériové periférne rozhranie (Serial Peripheral Interface).

TFF Time To Fix.

TXCO Teplotne kompenzovaný kryštálový oscilátor (Temperature Compensated Crystal Oscillator).

UTC Koordinovaný svetový čas (Coordinated Universal Time).

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Architektúra IoT siete [2].	10
Obr. 2 Globálne pokrytie siete Sigfox [10].....	15
Obr. 3 Comb drive mikro-obrábaný rezonátor [15].....	18
Obr. 4 Štruktúra akcelerometra [14].	19
Obr. 5 RNSS frekvenčné spektrum pre GNSS signály [21].	25
Obr. 6 Bloková schéma rádia Wisol [32].	36
Obr. 7 Bloková schéma zariadenia.	38
Obr. 8 Zapojenie rádiovkej antény.	39
Obr. 9 2D návrh funkčného vzorku (vrch, spod).	41
Obr. 10 3D návrh funkčného vzorku.	41
Obr. 11 monopolná, meandrovaná invertovaná F, helická anténa [36]	42
Obr. 12 Rozmery IFA (DN023) [38].	43
Obr. 13 Štruktúra rámca protokolu UBX [31].	53
Obr. 14 Ilustračné pokrytie siete SigFox na území ČR [10].....	56
Obr. 15 Vyžarovacia charakteristika v smere XY.	57
Obr. 16 Vyžarovacia charakteristika v smere XZ.....	58
Obr. 17 Vyžarovacia charakteristika v smere YZ.....	58

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozmery IFA (DN023) [38].	43
Tab. 2 Vyhodnotenia odberu zariadenia.	59