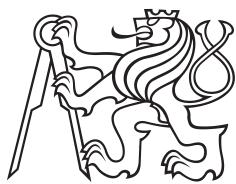


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Přenos telemetrických dat z meteorologického balónu

Jakub Dvořák

Vedoucí: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.

Obor: Elektronika a komunikace

Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **492178**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Přenos telemetrických dat z meteorologického balónu

Název bakalářské práce anglicky:

Telemetric Data Transmission from Meteorological Balloon

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte rádiový spoj mezi meteorologickým balónem a pozemním segmentem. Přenášená data z meteorologického balónu musí obsahovat minimálně informace o jeho poloze (GNSS). Ostatní data ze senzorů (poloha, teplota, tlak, vlhkost, inerciální informace) budou logovány přímo v měřícím systému balónu. Na základě parametrů vysílaného / přijímaného signálu a informací z telemetrii vytvořte model šíření pro daný typ spoje (případně i jiné možnosti propojení) během jeho vzestupné trasy. Za předpokladu možnosti vypuštění meteorologického balónu vše experimentálně ověřte a porovnejte model šíření zahrnující měřený profil atmosférických parametrů s reálnými daty.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PECHAČ, Pavel, ZVÁNOVEC, Stanislav. Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [2] ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner, sv. 2. ISBN 978-80-200-1505-1.
- [3] McNamara, Marilyn C. An Analysis of Burst Altitude for Weather Balloons. Antonian Scholars Honors Program, 2016, [online], citováno 27.1.2022, dostupné z: https://sophia.stkate.edu/shas_honors/43.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu Tomášovi Kořínkovi za cenné rady a pomoc při realizaci práce.
Děkuji Ing. Martinu Motlovi a Pavlu Žáru skému za pomoc s vypouštěním sondy.

Poděkování také patří mé maminec za pomoc při hledání sondy a za její nález.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Praze, 20. května 2022

Anotace

Tato práce se zabývá návrhem a realizací sondy schopné měřit podmínky ve vyšších vrstvách zemské atmosféry. Naměřená data jsou zpracována a využita při tvorbě modelu šíření pro daný typ spoje. Práce obsahuje výběr stežejních hardwarových komponent, návrh designu desek plošných spojů a stejně tak mechanickou zástavbu elektroniky. Dále se práce zabývá návrhem a realizací pozemní stanice schopné přijímat data a formátovat je do zprávy pro anténní sledovač a realizací sledovacího softwaru na vykreslování trajektorie sondy v reálném čase. Práce poté zmiňuje jak způsoby testování elektroniky sondy, tak měření parametrů komponent, jež jsou součástí radiového spoje.

Klíčová slova: atmosféra, refrakce, meteorologická sonda, troposféra, útlum volného prostoru

Vedoucí: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.

Abstract

This thesis focuses on the design and implementation of a high altitude sonde capable of measuring conditions in the upper atmosphere layers. The measured data is processed and used in the development of a propagation model. The work includes the selection of the core hardware components, the design of the printed circuit boards, as well as a physical case for the electronics. The thesis also covers the design and implementation of a ground station capable of receiving and formatting the data it into a message for the antenna tracker, and the implementation of the tracking software to provide real-time mapping of the sonde trajectory. The thesis also mentions both methods for testing the sonde electronics and for measuring the parameters of the components that form part of the radio link.

Keywords: atmosphere, refraction, meteorological sonde, troposphere, free space loss

Title translation: Telemetric Data Transmission from Meteorological Balloon

Obsah			
1 Úvod	1	4 Realizace systému 13	
1.1 Cíl práce	1	4.1 Elektronika sondy	13
1.2 Způsob řešení	1	4.1.1 Použité komponenty	13
2 Návrh experimentu	3	4.1.2 DPS pro připojení modulů ..	17
2.1 Šíření vln ve troposféře	3	4.1.3 Napájení	17
2.1.1 Troposférická refrakce	3	4.1.4 Ochrana pinů	19
2.1.2 Rádiový spoj	4	4.2 Mechanická zástavba	20
3 Návrh systému	7	4.3 Firmware sondy	21
3.1 Požadavky	7	4.3.1 Obsluha senzorů	22
3.2 Návrh systému	8	4.3.2 Rozebírání GPS dat	23
3.2.1 Elektronika sondy	8	4.3.3 Zjištění náklonu sondy	26
3.2.2 Sledování sondy	10	4.4 Realizace pozemní stanice	28
3.2.3 Firmware sondy	12	4.5 Software pro zobrazení telemetrických údajů	30
3.2.4 Mechanická zástavba	12	4.6 Testování a měření	32
3.2.5 Pozemní stanice	12	5 Experiment 35	
3.2.6 Software pro zobrazení telemetrických údajů	12	5.1 Průběh experimentu	35
		5.2 Naměřená data	36

6 Výsledky	39
6.1 Výstup z experimentu	39
7 Závěr	43
7.1 Shrnutí experimentu	43
7.2 Možná vylepšení	44
A Literatura	45
B Seznam použitých zkratek	
C Schémata a desky plošných spojů	
D Zadání práce	

Obrázky

2.1 Ztráty volným prostorem v závislosti na vzdálenosti podle (2.5)	5	4.12 Rotace sondy kolem osy tvořené vektorem magnetické indukce (pohled zespod)	28
3.1 Blokové schéma sestavy	8	4.13 Anténa na příjem dat pro vykreslování pozice na mapě	31
4.1 Směrové charakteristiky antény pro různá natočení kolem její osy	16	4.14 Trajektorie letu zobrazena pomocí python skriptu 4.11	32
4.2 Vymodelované moduly	17	4.15 Sonda umístěna v klimakomoře	33
4.3 Redukční desky pro moduly	18	4.16 Profil trasy mezi Prahou a horou Říp, vykresleno pomocí [26]	33
4.4 Závislost účinnosti na výstupním napětí pro daná vstupní napětí a výstupní napětí $V_{\text{out}} = 5 \text{ V}$, převzato z [9]	18	5.1 Pozemní segment	36
4.5 Zdrojová část elektroniky sondy	19	6.1 Výškový profil refraktivity	40
4.6 Příklad ošetření vstupů TVS diodami	20	6.2 Proložené hodnoty refraktivity exponenciální křivkou	41
4.7 Kryt sondy	20	6.3 Profil refraktivity pro první dva kilometry a proložení lineárními přímkami	42
4.8 Výsledný model	21	6.4 Průběh výkonu přijatého spektrometrem, výšky sondy a vlhkosti okolí v čase	42
4.9 Vývojový diagram pro kompenzací měřených hodnot senzorem MS5607, převzato z [17]	23		
4.10 Zrychlení působící na sondu ...	27		
4.11 Měření náklonu sondy pomocí vektoru magnetické indukce	28		

Tabulky

4.1 Módy GPS přijímačů u-blox, převzato z [11]	14
4.2 Rozsah senzoru MS5607, převzato z [17]	15
4.3 Formát \$GPGLL zprávy	24
4.4 Formát telemetrické zprávy	26
4.5 Formát dat ukládaných na SD kartu	27
4.6 Formát GPGGA zprávy	30
5.1 Surová data času a výkonu změřeného spektrálním analyzátorem	38

Kapitola 1

Úvod

■ 1.1 Cíl práce

Tato práce je zaměřena na tvorbu modelu šíření radiového paprsku v atmosféře. Mezi prvky, ovlivňující kvalitu rádiového spoje, patří například ztráty volným prostorem, ale také troposférická refrakce - ohyb paprsku díky různým podmínkám v nižších vrstvách atmosféry.

■ 1.2 Způsob řešení

Pro měření podmínek ve troposféře bude zkonstruována meteorologická sonda vlastního návrhu, která bude schopna měřit veličiny, ovlivňující šíření radiového signálu. Mezi měřená data bude patřit teplota, relativní vlhkost a tlak. Přítomný GPS přijímač bude poskytovat zeměpisné souřadnice a nadmořskou výšku. Dále bude pozemním segmentem měřen výkon rádiového signálu a teoretický útlum bude porovnávaný s měřenými hodnotami.

Kapitola 2

Návrh experimentu

Následující kapitola popisuje teorii využívanou při návrhu experimentu a výběru senzorů. Nakonec popisuje samotný návrh experimentu, díky kterému je možné vytvořit matematický model přenosu radiového signálu a následné ověření modelu změřenými daty.

■ 2.1 Šíření vln ve troposféře

■ 2.1.1 Troposférická refrakce

Při průchodu vlny atmosférou Země je paprsek ovlivněn změnou prostředí, ve kterém se šíří. V závislosti na teplotě, tlaku a hustotě se mění i index lomu atmosféry, který má za následek refrakci - lom paprsku. Index lomu troposféry může nabývat hodnot mezi $n = 1,000325$ při povrchu Země až $n = 1,000110$ pro vrchní hranici troposféry [1], nacházející se přibližně ve výšce 10 km [2].

Pro přehlednost se zavádí tzv. refraktivita (*refractivity N*), definována jako

$$N = (n - 1) \cdot 10^{-6}. \quad (2.1)$$

Jednotky refraktivity jsou tzv. N -jednotky.

2. Návrh experimentu

Podle doporučení ITU-R P.453 [4] lze pro frekvence do 100 GHz spočítat refraktivitu jako

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right), \quad (2.2)$$

kde T je absolutní hodnota v K, p je atmosférický tlak v hPa a e je tlak vodních par v hPa. Ten lze vypočítat pomocí hustoty vodních par z doporučení ITU-R 836 [3]. Podle [4] lze tlak vodních par vypočítat také podle relativní vlhkosti vzduchu H jako

$$e = \frac{H}{100} 6,1121 e^{\frac{17,502t}{240,97+t}}, \quad (2.3)$$

kde t je teplota v °C. Vztah platí v rozsahu teplot od -20 °C do 50 °C [1]. Jestliže budeme průběh refraktivity s výškou po částech approximovat úsečkami, můžeme díky jejím směrnicím mluvit o *výškovém gradientu refraktivity*, který popisuje změnu refraktivity s výškou. Gradient je užitečný pro určení ohybu paprsku, jelikož ohyb nastává při změně refraktivity.

Z rovnic (2.2) a (2.3) je patrné, že pro stanovení výškového profilu refraktivity je potřeba měřit teplotu, tlak a relativní vlhkost.

2.1.2 Rádiový spoj

Před samotným návrhem elektroniky je potřeba navrhnout rádiovou linku a ověřit výkonovou bilanci rádiového spoje. Antény použité pro vysílání i příjem jsou kvadrifilární šroubovité antény s levotočivou polarizací. Parametry antény jsou uvedeny v kapitole 4.1.1.

Výkonová bilance spoje lze zapsat jako:

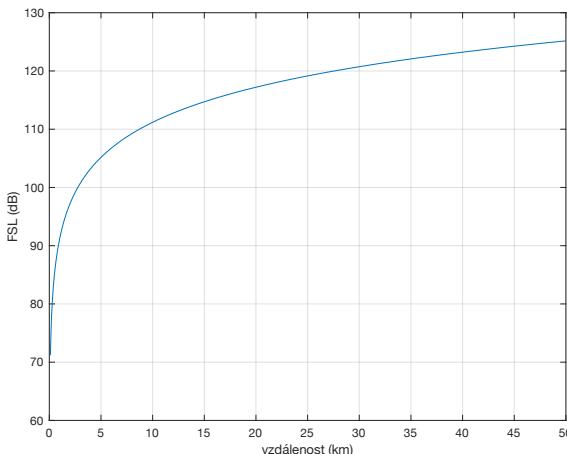
$$P_P = P_V + G_V + G_P + G_{LNA} - FSL - L_{kabel} - L_{splitter}, \quad (2.4)$$

Kde G_V a G_P jsou zisky antén, P_V je výkon vysílače měřený na vstupu antény, G_{LNA} zisk nízkošumového zesilovače, FSL jsou ztráty volným prostorem (*free space loss*), L_{kabel} ztráty kabelu a $L_{splitter}$ ztráty děliče výkonu, rozdělující signál mezi spektrální analyzátor a přijímač radiového signálu.

Výkonová bilance byla počítána s ohledem na blokové schéma pozemního segmentu na obr. 5.1 v kapitole 5.

Ztráty volným prostorem byly spočteny podle [1] jako

$$L_{FSL} = 32,4 + 20\log(f_{MHz}) + 20\log(d_{km}). \quad (2.5)$$



Obrázek 2.1: Ztráty volným prostorem v závislosti na vzdálenosti podle (2.5)

V případě sondy se jedná o konstantní frekvenci $f_{\text{MHz}} = 869,63$ a ztráty volným prostorem jsou tedy závislé pouze na vzdálenosti. Proto je lze vyjádřit pouze jako interval krajních hodnot. Místo vypuštění sondy, Praha - Libuš, je od budovy FEL v Dejvicích vzdálené 11,2 km. Maximální vzdálenost s ohledem na maximální výšku a predikci letu byla určena jako 50 km.

Zisky resp. útlumy jednotlivých částí rádiové linky jsou zaneseny níže.

$$\begin{aligned}
 P_V &= 22,3 \text{ dBm} \\
 G_V &= 4,21 \text{ dBi} \\
 G_P &= 4,21 \text{ dBi} \\
 G_{\text{LNA}} &= 40 \text{ dB} \\
 L_{\text{kabel}} &= 2,5 \text{ dB} \\
 L_{\text{splitter}} &= 3,6 \text{ dB} \\
 L_{\text{FSL}} &= [112,16..125,16] \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Výstupní výkon vysílacího modulu P_V byl změřen v kapitole 4.1.1. Výsledný výkon očekávaný na vstupu spektrálního analyzátoru tedy bude po dosazení do (2.4):

$$P_P = 22,3 + 4,21 + 4,21 - [112,16 .. 125,16] + 40 - 2,5 - 3,6 \text{ dBm.} \quad (2.6)$$

očekáván v rozmezí od $P_{P_{\max}} = -48$ dBm do $P_{P_{\min}} = -61$ dBm. Stejné úrovně výkonu lze díky děliči výkonu očekávat i na vstupu přijímače telemetrických dat. Hodnoty úrovně jsou určeny podle teoretických předpokladů a za ideálních podmínek.

Kapitola 3

Návrh systému

V této kapitole se stanovují požadavky na systém a jsou specifikovány podmínky, ve kterých musí sonda fungovat a jaké parametry, jako např. hmotnost, musí sonda splňovat. Dále je vedena diskuze o možných přístupech řešení elektroniky a ty jsou rozebírána z hlediska robustnosti a časové náročnosti. V této kapitole jsou také uvedeny nejpoužívanější způsoby sledování sondy, které jsou popsány a porovnány.

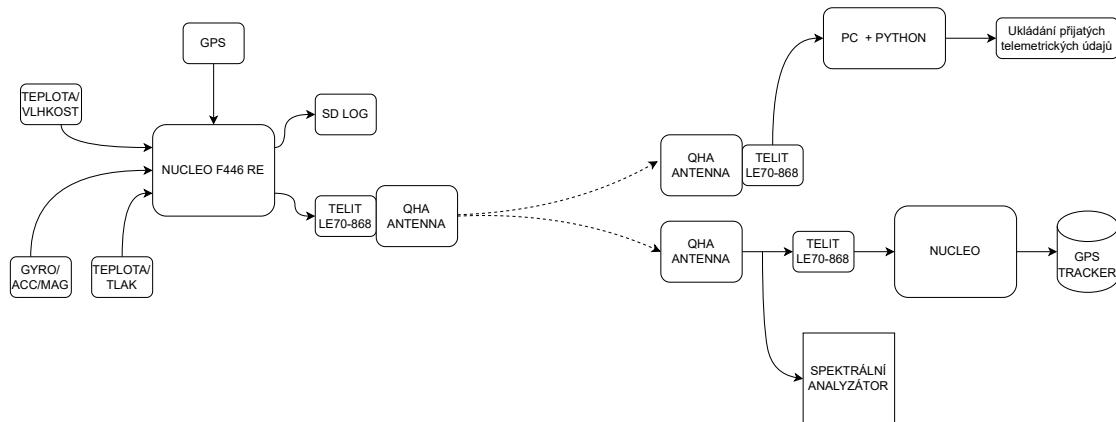
Schéma celé sestavy je znázorněno na obr. 3.1.

3.1 Požadavky

Hlavním požadavkem je posílání telemetrických údajů o poloze a ukládání zbylých naměřených dat na SD kartu umístěnou na palubě sondy. S ohledem na panující podmínky ve vyšších vrstvách zemské atmosféry musí být sonda schopna operovat za nízkého tlaku a teploty. Toto se vztahuje jak na integrované obvody a senzory, tak na baterie, používané k napájení sondy. Další podmínkou je spolehlivé fungování v oblasti vysoké vlhkosti - oblačnosti a za deště.

Z důvodu dlouhé čekací doby na povolení vypuštění balónu, které vydává Úřad pro civilní letectví, je využito povolení, které má dlouhodobě sjednaný Český hydrometeorologický ústav (dále jen ČHMÚ). Toto povolení se vztahuje na vypouštění volných balónů s užitečným zatížením do celkové hmotnosti 600 g. Denní sonda Vaisala RS41, kterou

3. Návrh systému



Obrázek 3.1: Blokové schéma sestavy

ČHMÚ posílá 3× denně, váží 84 g. Sonda vyvýjená v rámci této práce tedy musí splňovat požadavek na hmotnost do 516 g.

Komerčně dostupné GPS přijímače jsou od výrobce zablokovány pro použití ve výškách větších jak 10 km n. m. [10] a je nutné zvolit přijímač, který podporuje tzv. *airborne mode* [11]. Díky němu se zvýší maximální pracovní výška na maximum dovolené samotným přijímačem.

3.2 Návrh systému

3.2.1 Elektronika sondy

V samotném návrhu elektroniky sondy bylo možné zvolit jeden ze dvou přístupů. Níže práce popisuje výhody, nevýhody a potenciální rizika každé z nich. Dále zdůvodňuje přístup, který byl zvolen při řešení této práce.

Využití vývojových modulů

V dnešní době existuje velké množství mikročipů a MEMS čipů, které lze zakoupit ve formě modulů. Jedná se zpravidla o malé deky plošných spojů osazených konkrétními integrovanými obvody s minimem potřebných součástek zajišťujících správné fungování. Zpravidla se jedná o blokovací kondenzátory umístěné v bezprostřední blízkosti čipů,

poskytující elektrickou energii při rázovém odběru. Moduly mají vyvedené piny mikročipů na pinové lišty nacházející se zpravidla na okraji DPS.

V případě mikroprocesoru se jedná o vývojový kit Nucleo od firmy *STMicroelectronics*. Kit se skládá z DPS s mikroprocesorem a minimem součástek, nutných pro správné fungování procesoru. Součástí desky je také zdroj pro napájení čipu a programátor, kterým lze do mikroprocesoru nahrát firmware. Jednotlivé piny mikroprocesoru jsou vyvedeny na pinové lišty na kraji desky a slouží ke snadnému propojení s moduly.

Výhodou tohoto řešení ve fázi vývoje je snadná záměna zapojení modulů a rychlé odstranění chyb způsobené chybným výběrem komunikačních pinů mikroprocesoru.

Nevýhoda tohoto řešení je malá robustnost zapojení. Komunikační cesty mezi mikroprocesorem a senzory jsou zbytečně dlouhé, jelikož jsou podřízeny umístění pinů na pinových lištách. Další nevýhodou je nemožnost ovlivnit umístění blokovacích kondenzátorů u mikroprocesoru a nebo zvýšení jejich počtu. Vývojový kit Nucleo není tvořen s ohledem na malé rozměry a velikost DPS tohoto kitu ovlivňuje celkovou velikost a hmotnost sondy.

Samostatné senzory

Druhá cesta, kterou je možná se vydat při vývoji elektroniky v sondě je samostatná deska, která obsahuje jednotlivé integrované obvody bez jejich modulů a separátních DPS. Díky tomu je možné minimalizovat vzdálenost mezi mikroprocesorem a senzory a zvýšit robustnost napájení čipů. Celková velikost desky je poté dána především schopnostmi návrháře.

Toto řešení je časové náročnější, než první zmíněné a v případě způsobené chyby se špatně odstraňují chyby. V případě zničení, nebo nefunkčnosti nějaké elektronické součástky je nutné její odpájení z desky, což může ohrozit komponenty v okolí. V případě modulů lze vyměnit modul samotný.

Při řešení této práce byla zvolena cesta modulů. Důvodem bylo malé množství času neumožňující případné zdlouhavé odladování zapojení a také nedostatek součástek samotných. V tomto případě byly dostupnější senzory ve formě modulů a mikroprocesor ve formě vývojového kitu.

■ 3.2.2 Sledování sondy

Sledování sondy lze realizovat několika způsoby. Níže jsou popsány nejčastější z nich a jsou diskutovány výhody, nevýhody a možná rizika.

■ GSM tracker

Amatéry často využívána, nicméně nedoporučovaná metoda [6] je zasílání dat skrze mobilní síť. GSM sítě, přes které se data posílají, jsou určena pro telefony v okolí země a ve vyšších výškách může dojít k výpadku signálu. Velké množství sond také přistane v neobydlených a odlehlých oblastech, ve kterých nemusí být dostatečný signál pro přenos dat.

■ APRS

APRS (*A*utomatic *P*acket *R*eporting *S*ystem) je radioamatéry často využívaný způsob sledování sondy, jelikož jde o způsob levný a spolehlivý a mnoho radioamatérů má vlastní vybavení pro posílání dat přes APRS. Základem je APRS vysílač, který lze koupit, nebo postavit. GPS data, spolu například s teplotou a tlakem, jsou následně takto vysílána a přijímána amatérskými rádii [6]. Data se poté budou pošlou dál, nebo se nahrají na internetovou stránku k tomuto účelu zřízenou, odkud je může každý sledovat.¹ Nevýhodou APRS sledovače je bohužel fakt, že pokud sonda přistane v neobydlené a odlehlé oblasti, kde nejsou žádné amatérské rádiové stanice, není možno data odeslat. Proto je APRS sledovač vhodný pouze jako záloha, nebo doplnění, není dobré na něj spoléhat se stoprocentní jistotou. Pokud se vysílač nepovede vyslat souřadnice místa dopadu, můžeme přesto APRS vysílač najít pomocí radiového přijímače, naladěného na vysílací frekvenci, a směrové antény. Další nevýhoda je potřebná licence pro vysílání na frekvenci 144,8 MHz, na které probíhá APRS [7].

■ Satelitní sledovač

Další způsob je využití satelitního sledovače. Jedná se zpravidla o zařízení na sledování majetku v případě odcizení. Získaná data o poloze se posílají přes síť satelitů na nízké oběžné dráze Země. Využívána je služba *Globalstar*, jež se specializuje na provoz satelitních

¹aprs.fi

telefonů. Ze satelitů jsou následně data poslána na speciální internetovou stránku, kde jsou přístupná například z počítače, nebo mobilní aplikace. Pozice lze také zaslat přes SMS bránu, jako zprávu na mobilní telefon. Výhodou je širší pokrytí oproti GSM síti.

Toto řešení má nicméně i své nevýhody. GPS čip ve sledovači je omezený do maximální výšky 6 500 m n. m. [8]. Kvůli tomu nastane po dosažení takové výšky tzv. blackout, kdy GPS čip přestane reagovat. Po následném sestupu sondy pod hladinu 6 500 m n. m. se GPS čip opět připojí a sledovač opět začne fungovat. Další z problémů je fakt, že sledovač musí mít GPS anténu neustále nasměrovanou k obloze, tudíž, pokud se při dopadu sonda nějak překlopí, není možné zaměřit její pozici.

■ Přímé posílání GPS dat

Pro tuto práci je implementačně nejjednodušším řešením přímé posílání GPS dat. S ohledem na zadání je nutné v rámci práce telemetrická data o poloze ze sondy posílat a tedy tyto informace lze využít k samotné lokalizaci a následnému nalezení sondy. Rizikem je dopad do oblasti, kde se omezí dosah telemetrického signálu. Např. do hustého lesa, nebo do zástavby.

S ohledem na hmotnost, kterou by předešlá řešení přidala k celkové hmotnosti, bylo zvoleno tohoto způsobu sledování.

■ Zjištění pozice sondy ČHMÚ

Jak již bylo zmíněno, sonda ČHMÚ je při letu zavěšena pod vyvýjenou sondou. Data vysílaná sondou ČHMÚ jsou přijímána a dekódována v místě vypuštění, ale také jsou zachytávána amatérskými rádii a informace o poloze jsou sdílena na internetu. Tento způsob je spolehlivý, jelikož vysílací část je komerčně prodávaná a určena pro profesionální použití. Přijímacích stanic je velké množství a tedy je vysoká pravděpodobnost, že budou data ze sondy zachycena.

Nevýhodou je, že sonda ČHMÚ není přímou součástí vyvýjené sondy a tedy může dojít k odtržení. Tento způsob sledování je tedy brán jako záloha.

■ 3.2.3 Firmware sondy

Firmware pro mikroprocesor v sondě zajišťuje inicializaci senzorů, správné čtení dat ze senzorů, jejich zpracování. Dále je nutné načítání data z GPS modulu a jejich rozdělení na dané zprávy a bloky informací využívaných pro určení pozice v prostoru. Všechny získané informace je poté nutno sešít do zprávy posланé telemetrií na zem a uložit na externí paměť.

Nutnou součástí firmwaru je také ošetření chybových stavů a možných errorů, vyvolaných chybným čtením dat a nebo fyzickými podmínkami prostředí.

■ 3.2.4 Mechanická zástavba

Mechanická zástavba celé sondy musí splňovat požadavky pracovníků ČHMÚ, aby nedošlo k poničení balónu a způsobení škod při dopadu na zem. Jelikož je sonda Vaisala RS41 pověšena pod sondu vznikající v rámci této práce, je nutné zajistit robustnost a zamezit odpojení sondy Vaisala, nebo rozpadu vyvíjené sondy.

■ 3.2.5 Pozemní stanice

Firmware pro mikroprocesor v pozemní stanici zodpovídá za správné dekódování přijatých telemetrických údajů. Firmware musí určit, která data jsou validní. Přijatá data je poté nutno zformátovat do zprávy určené pro anténní tracker, umístěný na střeše budovy FEL v Dejvicích. Firmware musí být odolný vůči náhodným chybám způsobených přenosem na velkou vzdálenost. Příjem i posílání dat probíhá přes sériovou linku.

■ 3.2.6 Software pro zobrazení telemetrických údajů

Software určený pro příjem a zobrazení telemetrických údajů. Zobrazení dat probíhá počítači umístěném v automobilu jedoucím ve směru dopadu sondy. Software musí určit validní data a vyznačit GPS pozici sondy na mapě. Další funkci softwaru je výpis souřadnic, výšky a rychlosti sondy a teploty okolí sondy. Data jdoucí do programu jsou posílána přes sériovou linkou z přijímače signálu vysílaného sondou.

Kapitola 4

Realizace systému

Tato kapitola se zabývá samotnou realizací sondy. V textu jsou uvedeny jednotlivé moduly zodpovídající za měření dat a jsou popsány motivace jejich výběru. Dále text rozebírá dílčí části firmwaru sondy a způsob, jakým byly řešeny problémy, které nastaly vinou nestandardních podmínek. Popisuje vysílací část (sondu) a přijímací části (pozemní stanici, která formátovala data do zprávy čitelné anténním trackerem a přijímací software na zobrazení pozice na mapě).

■ 4.1 Elektronika sondy

■ 4.1.1 Použité komponenty

Níže jsou zmíněny druhy senzorů, které jsou nutné pro měření podmínek v troposféře, které ovlivňují přenos radiového signálu. Jak již bylo zmíněno, senzory musí být schopny měřit veličiny v rozsahu hodnot, které panují ve troposféře. Velký výběr modulů s mnohými senzory a dalšími elektrickými součástkami nabízí firma *Microelektronika*. Jená se o produkty využívané pro výuku a rychlý vývoj. Výhodou je jejich sjednocený pinout a stejně rozměry konektoru (pinové lišty). Další důvod pro vyběr modulů od tohoto výrobce byla již jejich dostupnost na katedře elektromagnetického pole.

Platform	Max Altitude (m)	MAX Horizontal Velocity (m/s)	MAX Vertical Velocity (m/s)	Max Position Deviation
Portable	12000	310	50	Medium
Stationary	9000	10	6	Small
Pedestrian	9000	30	20	Small
Automotive	6000	84	15	Medium
At sea	500	25	5	Medium
Airborne <1g	50000	100	100	Large
Airborne <2g	50000	250	100	Large
Airborne <4g	50000	500	100	Large

Tabulka 4.1: Módy GPS přijímačů u-blox, převzato z [11]

■ GPS modul

GPS moduly jsou zpravidla omezeny dvěma parametry. Maximální nadmořsou výškou 18 km a maximální rychlostí 515 m/s vůči zemi. Někteří výrobci GPS modulů berou tato omezení v konjunkci, kdy pro zablokování modulu musí platit obě podmínky, některí výrobci uvažují disjunkci, kdy stačí, aby nastala jedna z pomínek a modul přestane dávat validní data. Modul, který byl vybrán je u-blox SAM-M8Q. Podle dokumentace GPS modulu [12] je maximální výška 50 km a maximální rychlosť 500 m/s. V případě letu balónu nebude splněna ani jedna z podmínek. Tento GPS modul je součástí vývojového modulu GNSS 4 Click od firmy *Microelektronika*.

U-Blox moduly nabízí široké množství pracovních módů podle charakter použití. Pro běžné použití se využívá mód *Portable*. Jedná se o kompromis mezi rozsahem a přesností určení pozice. Další módy jsou zobrazeny v tabulce 4.1. V případě sondy byl zvolen mód Airborne <1g. Při letu sondy není očekáváno zrychlení přesahující 1 g a rychlosti nad 100 m/s (360 km/h).

■ Teplotní a tlakový senzor

Podle [25] se tlak ve výšce 30 km pohybuje kolem hodnoty 10 mbar. S ohledem na očekávané rozsahy měřeného tlaku a teploty byl vybrán senzor MS5607 od firmy *TE Connectivity*. Rozsahy měřitelných hodnot jsou zaneseny v tabulce 4.2. Teplotní a tlakový senzor je součástí modulu od firmy *Parallax*. Výrobce na stránkách produktu [23] uvádí, že senzor byl úspěšně testován ve výšce 36 km.

Pressure	Min	Typ	Max	Unit
Range	10		1200	mbar
Range	-40		85	°C
Resolution	<0.01			°C
Accuracy	-0.8		0.8	°C

Tabulka 4.2: Rozsah senzoru MS5607, převzato z [17]

■ Vlhkostní senzor

Vlhkostní senzor byl zvolen AM2320, který je součástí modulu DHT22 Click od firmy *Microelektronika*. Senzor je schopen měřit v rozsahu od -40 do 80 °C a 0 až 100 % relativní vlhkosti.

■ Senzor orientace

Pro zjištění orientace bylo použito senzoru MPU9250, který je součástí modulu 9DOF Click. Jedná se o gyroskop, akcelerometr a magnetometr umístěný na jednom integrovaném obvodu. Senzor resp. modul byl vybrán, jelikož byl již dříve používán na jiných projektech a byl ihned dostupný. Díky tomu bylo možné co nejdříve přejít ke psaní ovladače pro vyčítání dat a jeho implementaci do systému. Senzor také splňuje rozsah pracovních teplot [15] a lze tedy využít v podmínkách, které při letu nastanou.

■ Radiový vysílač/přijímač

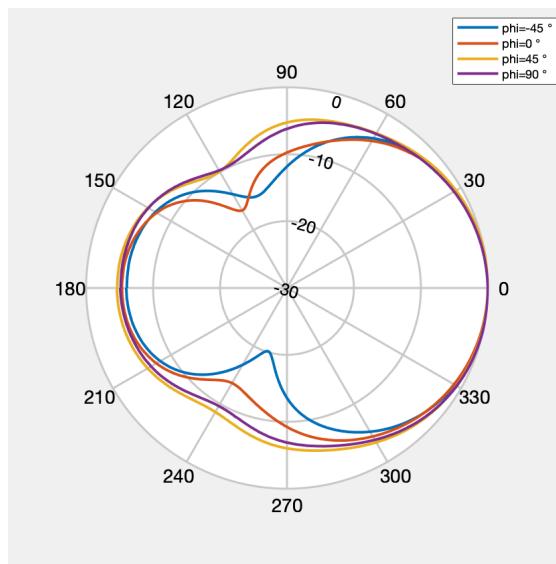
Pro přenos dat vyl využit rádiový modul Telit LE70 - 868. Jedná se o téměř *plug & play* zařízení. Data jsou do modulu posílána přes sériovou linku UART, odkud jsou následně přeposlána dál. Modul pracuje v režimu *half duplex* a tedy stejný typ modulu lze využít na příjem i vysílání dat bez nutnosti měnit nastavení.

Pomocí spektrálního analyzátoru byl změřen výstupní výkon $P_V = 22,3 \text{ dBm}$. Do této hodnoty je zahrnut i útlum koaxiálního kabelu mezi konektorem sondy a anténou. Podle dokumentace rádiového modulu [24] je citlivost přijímače $-111,7 \text{ dBm}$.

■ Antény

Antény využité v rámci této práce byly kvadrifilární šroubovicové antény (Quadrifilar Helix Antenna (QHA)). Jedná se o kruhově polarizované antény v tomto případě s levotočivou polarizací. Anténa byla sestavena z předohýbaných drátů a po kompletaci byla proměřena její charakteristika na vektorovém analyzátoru. Dále byla měřena směrová charakteristika vysílací antény (obr. 4.1). Ta byla měřena i spolu s krytem sondy, aby se do měřených dat přenesl také útlum plastu.

Měření směrové charakteristiky proběhlo na katedře elektromagnetického pole v bezodrazné komoře. Sonda byla připevněna na pohyblivou osu, která byla otáčena motorem, a postupně byl měřen přijatý výkon anténou umístěné naproti sondě. Díky tomu byla změřena vyzařovací charakteristika antény v rozsahu 360° . Celkem byly měřeny 4 směrové charakteristiky a to pro různá natočení sondy kolem své vlastní osy. Směrové charakteristiky antény jsou zaneseny na obr. 4.1.

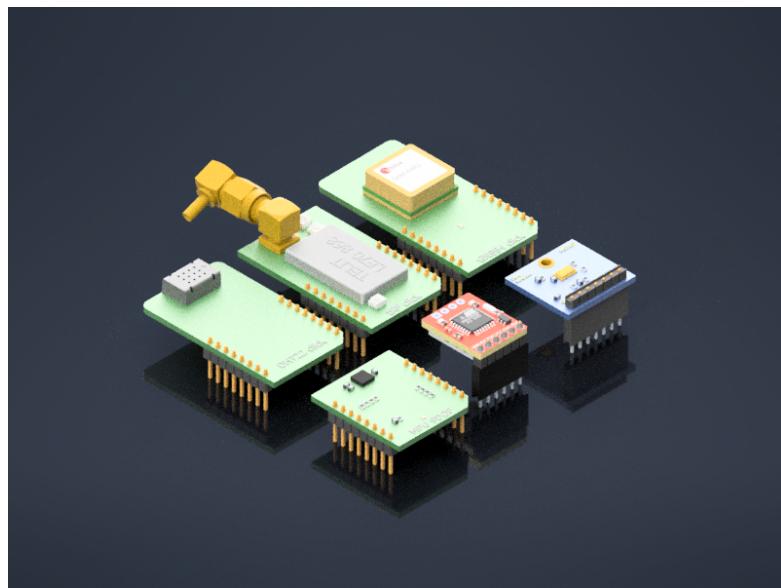


Obrázek 4.1: Směrové charakteristiky antény pro různá natočení kolem její osy

Dále byla měřena polarizace antény. V tomto případě byla sonda pevně umístěna na podstavci a otáčeno bylo přijímací anténou v její ose. Pro ideální kruhově polarizovanou anténu by nezáleželo na natočení přijímací antény. Koeficient polarizace ve směru vysílání výšel 1,18, pro vychýlení antény o 45° resp. -45° byl koeficient 1,28, resp. 1,39.

■ Modely použitých modulů

Pro přehlednost a optimální model krytu sondy bylo potřeba vymodelovat i jednotlivé moduly. Následně mohl být kolem přesného 3D modelu elektroniky vymodelován kryt bez nutnosti čekat na výrobu DPS.



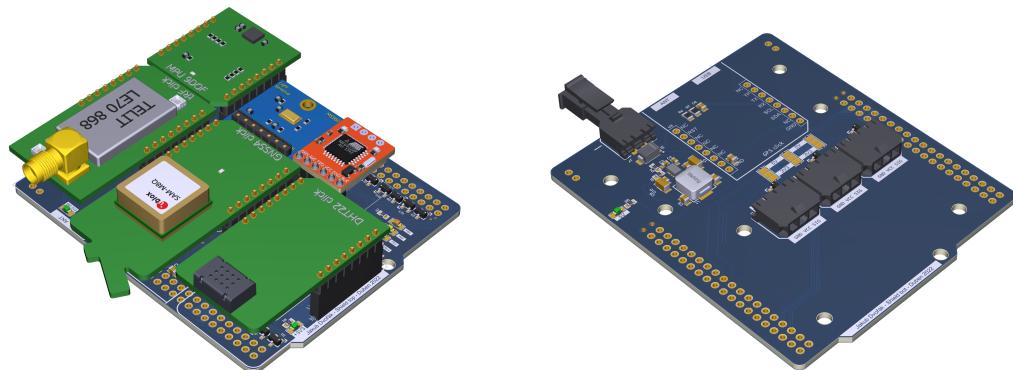
Obrázek 4.2: Vymodelované moduly

■ 4.1.2 DPS pro připojení modulů

Ve vývojové fázi práce byly moduly zapojeny skrze nepájivé pole a propojeny propojovacími kably s piny Nucleo desky. Moduly byly postupně přidávány souběžně s vývojem softwaru. Po odladění komunikace se všemi použitými moduly byly vytvořeny dvě redukční DPS na propojení Nucleo kitu a modulů. Moduly jsou vyobrazeny na obr. 4.3a a 4.3b.

■ 4.1.3 Napájení

Jako zdroj energie po dobu letu byly vybrány tužkové baterie *Energizer ultimate lithium*. Dle technického listu jsou schopny operovat až do teploty -40 °C při poklesu kapacity z 1200 mAh na 600 mAh [19]. Hodnota je udána pro konstantní vybíjecí proud. S ohledem



(a) : Vrchní redukční deska

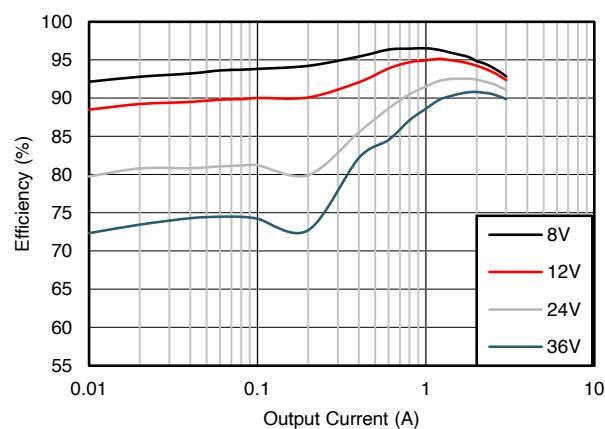
(b) : Spodní redukční deska

Obrázek 4.3: Redukční desky pro moduly

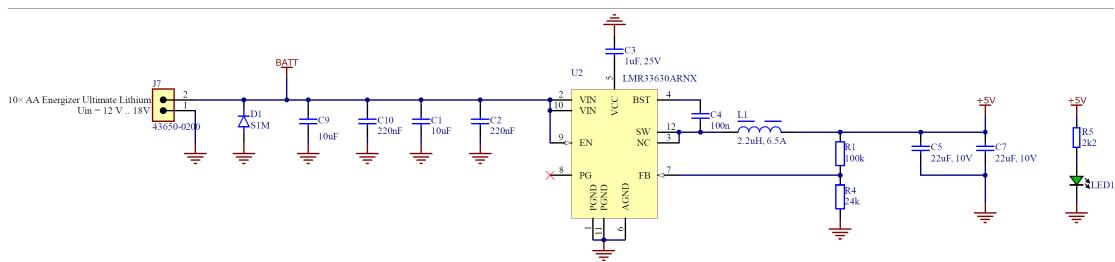
na teploty panující ve stratopauze, které klesají až k -60°C , byl počet zvýšen na 10 ks, nechávající kapacitní rezervu.

■ Zdroje

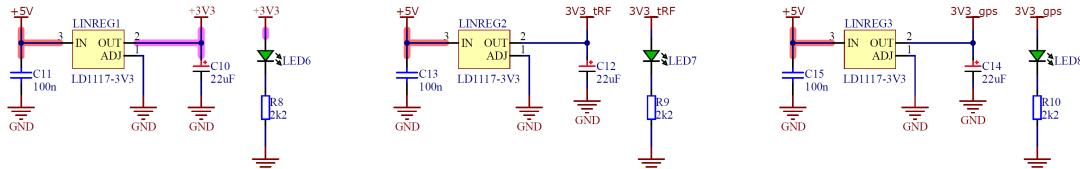
Vstupní napětí se v závislosti na teplotě a momentálním odběru pohybuje od 18 V do 10 V. Pro zvýšení účinnosti byl jako hlavní regulátor využit spínaný zdroj. S ohledem na dostupnost součástek a ověřenost funkčnosti byl vybrán spínaný zdroj *LMR33630* od firmy *Texas Instruments*. Účinnost tohoto zdroje se pohybuje pro přítomná napájecí napětí od viz graf na obr. 4.4.



Obrázek 4.4: Závislost účinnosti na výstupním napětí pro daná vstupní napětí a výstupní napětí $V_{\text{out}} = 5$ V, převzato z [9]



(a) : Schéma spínaného zdroje umístěného na spodní redukční desce



(b) : Schéma lineárních regulátorů umístěných na horní redukční desce

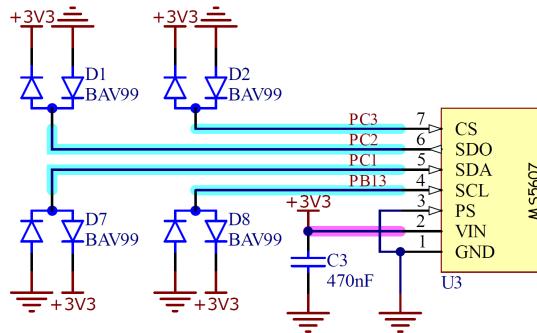
Obrázek 4.5: Zdrojová část elektroniky sondy

Další výhodou spínaného zdroje je minimální PSRR - *Power Source Rejection Ratio*. Výstupní napětí zůstává konstantní bez ohledu na změnu napětí na vstupu, dokud není překročeno minimální napájecí napětí - v našem případě rovnou výstupnímu napětí. Limitace čipu je poté 3,8 V [9].

Nevýhodou spínaných zdrojů je zanášení šumu do obvodu. Tento problém se vyřeší využitím lineárního regulátoru. Šum generovaný spínacím regulátorem by mohl způsobit nesprávné fungování mikroprocesoru a snižovat kvalitu příjmu GPS modulu. V tomto případě byla napájecí topologie následující. Napětí baterií bylo na spodní redukční desce spínacím regulátorem sníženo na 5 V. Toto napětí bylo následně skrze nevyužité piny vývojového kitu Nucleo přivedeno na horní redukční desku, kde bylo lineárním regulátorem sníženo na 3,3 V. Celkem jsou na desce tři větve s tímto napětím. Mikrokontrolér a senzory mají vlastní větev. Další lineární regulátor napájí pouze GPS modul a třetí lineární regulátor je určen pro radiový vysílač. Díky tomu nebude docházet k poklesu napětí napájení ve zbytku přístroje při vysílání dat.

4.1.4 Ochrana pinů

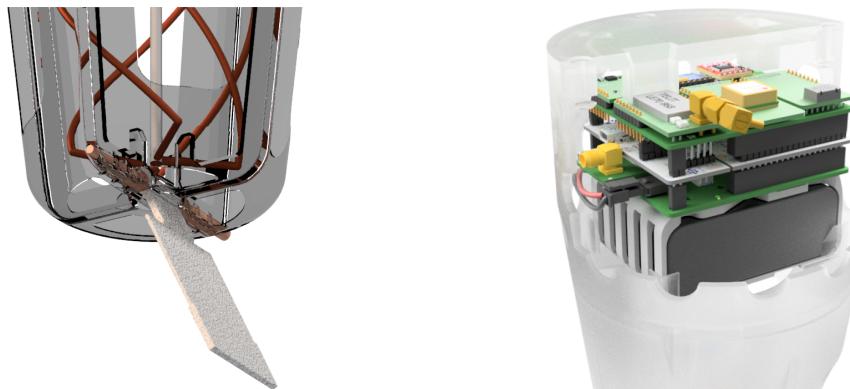
Jelikož většina pinů využívaných ke komunikaci byla snadno dostupná na dotyk při manipulaci, bylo potřeba je ošetřit vůči elektrostatickému výboji (ESD), který by měl za následek zničení čipu. Příklad ošetření GPIO pinů pomocí TVS diody BAV99 je na obr. 4.6.



Obrázek 4.6: Příklad ošetření vstupů TVS diodami

4.2 Mechanická zástavba

Součástí práce je i mechanická zástavba krytu pro elektroniku. Díky jednotlivým modelům bylo možné vytvořit kompletní model elektronické části, kolem kterého byl poté vymodelován kryt (obr. 4.7b). Kryt byl modelován s ohledem na anténu umístěnou ve spodní části. Stěny kolem antény jsou ztenčené, aby co nejméně ovlivnily ladění antény na 869,63 MHz. Malá mechanická odolnost stěn je kompenzována čtyřmi výztužemi vedoucí po obvodu stěny.

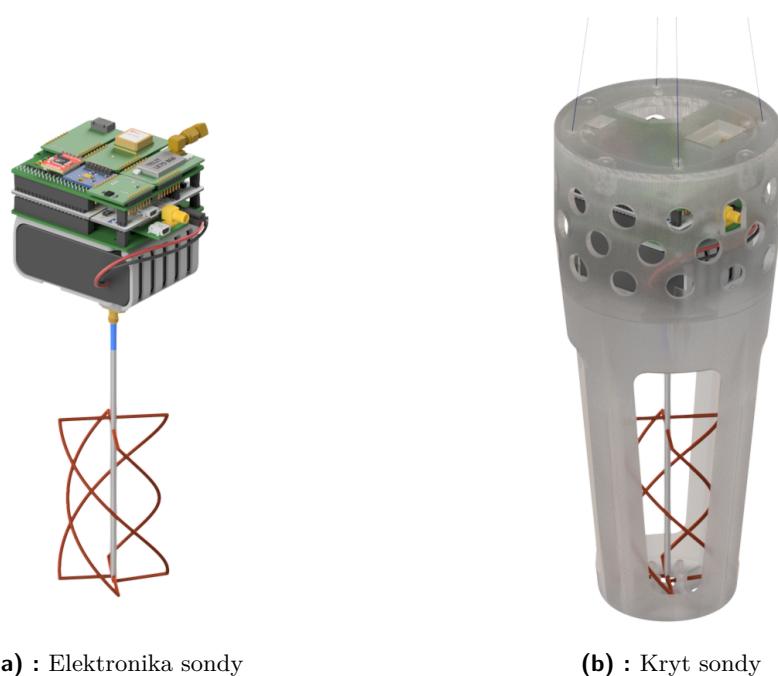


(a) : Gumový pás na přichycení skoby odvíječe

(b) : Řez vrchní části krytu sondy

Obrázek 4.7: Kryt sondy

Pro splnění hmotnostního limitu byl model krytu postupně odlehčován. Při ubírání materiálu bylo nutné brát v potaz, že hlavní původ velké hmotnosti není při 3D tisku objem tělesa, ale jeho stěny. Při tvorbě otvorů v modelu se tedy neušetřila hmotnost odpovídající objemu válce odebraného ze stěny, ale pouze dvěma jeho podstavám. Naopak materiál byl potřeba na plášt' odebraného válce. Výsledný model elektroniky sondy a krytu je na obr. 4.8.



(a) : Elektronika sondy

(b) : Kryt sondy

Obrázek 4.8: Výsledný model

Připojení sondy ČHMÚ bylo provedeno pomocí gumového pásu (obr. 4.7a), do kterého se zastrčila skoba odvíječe. To je zařízení, které zajistí postupné odmotání 50m lanka. 50 m je vzdálenost daná výrobcem, která musí být od balónu a dalších součástí sondy, aby byla zajištěna validní měření.

V případě, že by došlo k delaminaci 3D tisku, byla jak elektronika, tak sonda ČHMÚ přivázána pojistným provázkem uchyceným k hlavnímu závěsu spolu s padákiem a balónem. Díky tomu by sonda stále zůstala pohromadě i když by došlo k rozbití/rozlomení krytu.

■ 4.3 Firmware sondy

Pro přístup k periferiím mikrokontroléru bylo využito *HAL* (*Hardware Abstraction Layer*) knihoven od firmy *STMicroelectronics*. Jedná se o knihovny poskytující vrstvu abstrakce mezi přímým přístupem k periferií. Často má také jednotné rozhraní napříč různými mikrokontroléry od stejného výrobce. *STMicroelectronics*, stejně jako většina ostatních výrobců, ke svým mikrokontrolérům poskytuje právě *HAL* knihovny.

4.3.1 Obsluha senzorů

Pro vyčítání dat ze senzorů bylo potřeba napsání driveru. Ten má za úkol jak vyčtení dat ze senzoru, tak jeho samotnou inicializaci a nastavení.

Výčet dat ze senzoru AM2320 probíhá příkazem

```
1 uint8_t registers[3] = { 0x03, 0x00, 0x04 };
2 HAL_I2C_Master_Transmit(am2320->i2c_handle, am2320->device_address,
    registers, 3, HAL_MAX_DELAY);
```

Senzor následně vyšle data obsahující informace o vlhkosti a teplotě. Jejich příjem zajišťuje funkce

```
1 HAL_I2C_Master_Receive(am2320->i2c_handle, am2320->device_address,
    am2320->data, 8, HAL_MAX_DELAY);
```

Způsob přepočtu získaných dat na hodnoty teploty a tlaku je popsán v dokumentaci senzoru. Kód pro přepočet je následující:

```
1 int16_t temp_temperature = (am2320->data[5] | am2320->data[4] << 8);
2 if (temp_temperature & 0x8000) {
3     temp_temperature = -(int16_t) (temp_temperature & 0x7fff);
4 } else {
5     temp_temperature = (int16_t) temp_temperature;
6 }
7 *temperature = (float) temp_temperature / 10.0;
8 *humidity = (float) (am2320->data[3] | am2320->data[2] << 8) / 10.0;
```

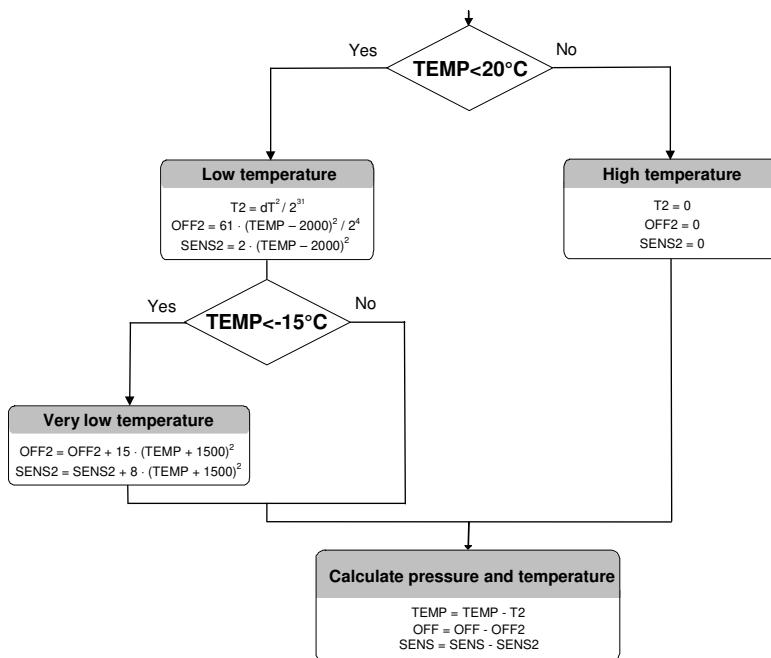
Pro senzor teploty a tlaku MS5607 je způsob výčtu dat obdobný. Nejdříve se pošle žádost o převod hodnoty jdoucí ze senzoru.

```
1 SPITransmitData = CONVERT_D1_COMMAND | Pressure_OSR;
2 HAL_SPI_Transmit(hspi, &SPITransmitData, 1, 10);
```

Následně se pošle žádost o vyčtení hodnot 24bit analogově digitálního převodníku pomocí následujícího kódu.

```
1 SPITransmitData = READ_ADC_COMMAND;
2 HAL_SPI_Transmit(hspi, &SPITransmitData, 1, 10);
3 HAL_SPI_Receive(hspi, reply, 3, HAL_MAX_DELAY);
4 uncompValues->pressure = ((uint32_t) reply[0] << 16) | ((uint32_t)
    reply[1] << 8) | (uint32_t) reply[2];
```

Hodnoty změřené tímto způsobem jsou nekompenzované a jsou ovlivněny nelinearitou senzoru. Pro správnou kompenzaci teploty a tlaku je zapotřebí využít vývojový diagram na obr. 4.9.



Obrázek 4.9: Vývojový diagram pro kompenzaci měřených hodnot senzorem MS5607, převzato z [17]

Na rozdíl od předešlých senzorů, tento senzor měří hodnoty a ukládá je do příslušných registrů průběžně. Registry senzoru jsou popsány v dokumentu [14]. Slouží k nastavení senzoru samotného, jeho identifikaci a k výčtu naměřených dat. U senzoru je potřeba nastavit vzorkovací frekvenci, rozsahy měřených hodnot a zdroj hodin. Pro následný přístup k datům na dané adresu se využije následujícího příkazu.

```

1  uint8_t data = ReadAddr | READWRITE_CMD;
2  HAL_SPI_Transmit(&MPU9250_SPI, &data, 1, HAL_MAX_DELAY);

```

Senzor následně vyšle hodnoty daného registru a jejich příjem proběhne pomocí funkce niže. Hodnoty ReadAddr a READWRITE_CMD jsou definovány v [14].

```
HAL_SPI_Receive(&MPU9250_SPI, pBuffer, NumBytesToRead, HAL_MAX_DELAY);
```

4.3.2 Rozebírání GPS dat

Data jsou GPS přijímačem posílána každou sekundu přes sériovou linku ve formátu NMEA zpráv [22]. Jedná se o standardizovaný formát GPS dat specifikovaný organizací NMEA (National Marine Electronics Association). Příklad NMEA zpráv je zanesen níže.

```
$GPRMC,132456.00,A,5005.77089,N,01421.46534,E,1.157,,290122,,A*78
$GPVTG,,T,,M,1.157,N,2.144,K,A*22
$GPGGA,132456.00,5005.77089,N,01421.46534,E,1,05,1.79,294.0,M,44.4,M,,*5D
$GPGSA,A,3,17,06,24,02,15,,,2.46,1.79,1.70*0B
$GPGSV,4,1,13,02,11,134,21,06,20,090,23,10,02,270,,11,06,128,19*76
$GPGSV,4,2,13,12,70,261,,15,10,185,15,17,17,041,13,19,37,054,*7B
$GPGSV,4,3,13,22,10,325,,24,72,147,23,25,31,257,08,28,08,068,21*7B
$GPGSV,4,4,13,32,25,313,*4C
$GPGLL,5005.77089,N,01421.46534,E,132456.00,A,A*69
```

Příklad formátu \$GPGLL zprávy je v tabulce 4.3, kde jsou popsána jednotlivá pole zprávy.

Tabulka 4.3: Formát \$GPGLL zprávy

Název	Příklad	Popis
Identifikátor zprávy	\$GPGLL	GLL hlavička
Zem. Šířka	5005.77089	ddmm.mmmm
N/S (Sever/Jih)	N	
Zem. Délka	01421.46534	dddmm.mmmm
E/W (Východ/Západ)	E	
UTC Čas	132456.00	hhmmss.sss
Status	A	A - data jsou validní V data nejsou validní
Mód	A	A - autonomous D - DGPS E - DR
Kontrolní součet	*69	
<CR> <LF>		Konec zprávy

Délka zprávy odeslané GPS přijímačem se liší podle dostupných údajů. Pokud GPS nezná svou polohu, pole pro zeměpisnou šířku a délku jsou prázdná. Proto nemůžeme očekávat zprávy fixní velikosti. Způsob, kterým se ve firmwaru sondy NMEA zpráva přijímá je znározněn v ukázce kódu 4.1.

```
1 HAL_UARTEx_ReceiveToIdle_IT(&huart1, GPSbuffer, sizeof(GPSbuffer));
```

Ukázka kódu 4.1: Funkce pro příjem dat z GSP

Tato funkce přijímá data až do doby, kdy nenastane klidový stav - GPS přestane vysílat data. V ten moment se vyvolá callback funkce.

```
1 void HAL_UARTEx_RxEventCallback(UART_HandleTypeDef *huart, uint16_t Size)
{
2     DataRecieved = Size;
3 }
```

Ukázka kódu 4.2: Callback funkce vyvolaná interruptem

V této funkci se do globální proměnné `uint16_t DataRecieved` uloží velikost přijatých dat. Pokud je v hlavní smyčce programu splněna podmínka, že `DataRecieved > 0`, program začne rozebírání přijatých dat funkcí 4.3. Pro rozdělení přijatých dat na jednotlivé NMEA zprávy se využívá znaků <CR> <LF>, které se nacházejí na konci každého řádku.

Součástí vyslaných dat jsou i \$GPGSV zprávy obsahující informace o viditelných satelitech. Zpráv tohoto typu je vysílá několik po sobě a počet vyslaných zpráv je zanesen v prvním poli této zprávy. Pro správně rozdělení přijatých dat je informace o počtu \$GPGSV zpráv nutná, jelikož ovlivňuje pořadí dalších zpráv.

Funkce `mainParse` v ukázce 4.3 rozdělí a uloží data do bufferu `uint8_t GPSparse[15][200] = {}` tvořeného 2D polem a zjistí počet \$GPGSV zpráv.

```

1 void mainParse(uint8_t* buffer, uint8_t* parse, uint8_t linelen, uint8_t* nsat){
2     uint8_t k[15] = {};//k-ty znak v n-tem radku
3     uint16_t iter = 0;//iteracni promenna
4     uint8_t n = 0;//n-ty radek
5
6     while(iter < DataRecieved){
7         if(!(buffer[iter] == '\n') || (buffer[iter] == '\r')){//dokud nenastane konec radku
8             parse[n*linelen + k[n]] = buffer[iter];
9             if((k[n] == 7) && (parse[n*linelen + 5] == 'V')){//hledani GSV zpravy, 7. znak je pocet satelitu
10                *nsat = parse[n*linelen + k[n]] - '0';
11            }
12            k[n]++;
13        }
14        else{
15            parse[n*linelen + k[n]] = '\n';//enter na konec radku
16            n++;//novy radek
17        }
18        iter++;//posun v RAW zprave - GPSbuffer
19    }
20 }
```

Ukázka kódu 4.3: Hlavní parsování funkce

Příklad volání funkce v hlavní smyčce programu je znázorněn v ukázce kódu 4.4.

```

1     uint8_t GPSparse[15][200] = {};//NMEA rozdelena podle radku
2     uint8_t nsat = 0;//pocet GSV zprav
3
4     uint8_t GLLposition[8] = {};//delka daneho pole v GLL
5     uint8_t GLL[8][11] = {};//GLL buffer
6
7     mainParse(GPSbuffer, GPSparse, 200, &nsat);
8     parseFrame(GPSparse, GLL, GLLposition, 13, 11, 0);
9
10 //analogicky pro ostatni NMEA zpravy, GGA, RMC...
```

Ukázka kódu 4.4: Volání funkcí v hlavní smyčce programu

Ve stejné větvi programu, kde se vykonává rozebírání NMEA zpráv, se vyčtou data ze senzorů. Tyto číselné hodnoty se poté převedou do textové podoby a přidají mezi vysílaná data. Převod z číselné hodnoty na textovou, obsahující ASCII znaky, slouží funkce `ftoa()`, která převádí číslo typu float a funkce `itoa()` pro převod čísla typu int.

Z rozebraných NMEA zpráv jsou poté vybrána data, která se spolu s naměřenými hodnotami ze senzorů, převedené do textové podoby, sesijí do první zprávy. Tato zpráva se posléze pošle skrze sériovou linku do radiového vysílače. K této zprávě se po odeslání přidají další data a zpráva je poslána do záznamníku, kde se uloží na SD kartu v lidsky čitelném formátu. Příklady vysílaných zpráv jsou v tabulkách 4.4 a 4.5.

UTC čas	Zem. šířka (°)	Zem. Délka (°)	Nadmořská výška (m)	Rychlosť (m/s)	Teplota (°C)	Tlak (Pa)
114231.00	5001.76165	N	01430.16855	E	9510.0	23.428

Přijatá zpráva: 114231.00;5001.76165;N;01430.16855;E;9510.0;23.428;-039.65;0028254

Tabulka 4.4: Formát telemetrické zprávy

4.3.3 Zjištění náklonu sondy

Aby bylo možné zjistit, jaká část směrové charakteristiky antény byla využita pro přenos dat, bylo nutné zjistit výchylku sondy od svislé osy. Zjištění výchylky sondy lze realizovat metodami jendoduššími a méně přesnějšími, nebo přesnými, sofistikovanými metodami.

Díky přítomnosti modulu 9DOF od firmy *Microelektronika* lze pro měření náklonu využít data z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Ve statickém případě lze pro výchylku využít pouze akcelerometr. Velikost zrychlení v ose z sondy se bude měnit spolu s vychylováním sondy od svislé polohy. Pro výchylku φ platí ve statickém stavu

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{a_z}{g} \right). \quad (4.1)$$

Pokud se bude sonda kýtat kolem pevného bodu, bude na ni působit i odstředivé zrychlení, které se bude přičítat k a_z . V tomto případě by šlo zjistit velikost odstředivého zrychlení díky gyroskopu, který měří úhlovou rychlosť. Pro odstředivé zrychlení a_o platí

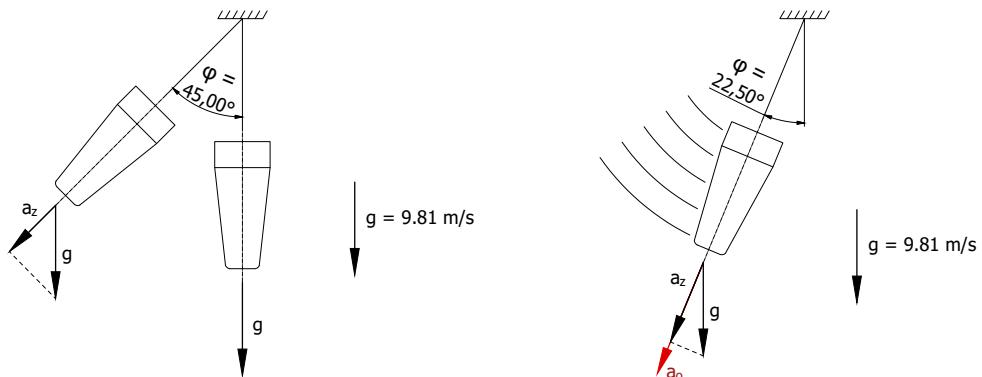
$$a_o = \omega^2 l, \quad (4.2)$$

kde ω je úhlová rychlosť daná jako $\frac{d\varphi}{dt}$ a l je délka závěsu sondy. V tomto případě ale nelze stanovit délku závěsu, jelikož balón, za který je sonda přichycena, není pevný bod.

Jak již bylo řečeno, zjištění výchylky φ je možné pouze při statiském stavu. K němu dochází, kdy se sonda dostane do maximální výchylky a poté se úhel začně opět snižovat. Pokud správně určíme moment, kdy k tomuto stavu došlo, můžeme správně určit maximální výchylku za danou periodu.

UTC čas	Zem. šířka (°)	Zem. Délka (°)	Nadmořská výška (m)	Rychlosť (m/s)	Teplota (°C)	Tlak (Pa)	Teplota 2 (°C)	Relativní vlhkost (%)	Typ GPS fixu		
114231.00	5001.76165	N	01430.16855	E	9510.0	23.428	-039.65	0028254	-40.5	003.2	2

Počet viditelných satelitů	PDOP	HDOP	VDOP	Nejmenší změřené zrychlení v ose Z	Velikost zrychlení	Velikost úhlové rychlosti	Velikost intenzity mag. pole
12	1.32	0.70	1.12	7062	12 -232 8452	52 -117 245	-4218 3765 -3276

Tabulka 4.5: Formát dat ukládaných na SD kartu

(a) : Změna zrychlení působící ve směru z při statickém vychýlení (b) : Změna zrychlení působící ve směru z při pohybu sondy

Obrázek 4.10: Zrychlení působící na sondu

Jak bylo dřívě zmíněno, měření dat probíhá jednou za sekundu a je iniciováno příjemem GPS dat. Mimo tohoto měření jsou s větší frekvencí měřena data o zrychlení sondy a do bufferu je ukládána nejnižší hodnota zrychlení ve směru osy z viz ukázka kódu 4.5. Funkce `filter(int *out, int *in, int *b)` je dolní propust prvního rádu. Po uměnutí sekundové periody se minimální hodnota vyčte z bufferu, uloží spolu s dalšími daty na SD kartu a buffer se vynuluje.

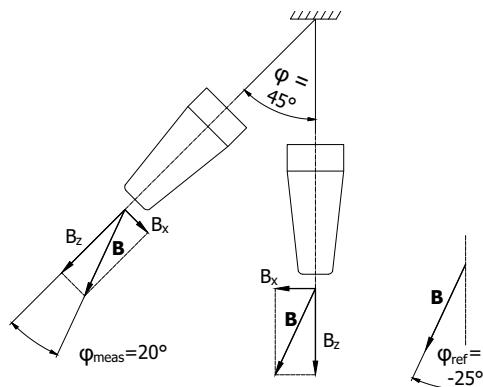
```

1 MPU9250_GetData(&AccData, &GyroData, &MagData);
2 filter(&AccFilt, &AccData, &b);
3 if(AccFilt[2] < AccMin){
4     AccMin = AccFilt[2];
5 }
```

Ukázka kódu 4.5: Zjištění minimálního zrychlení

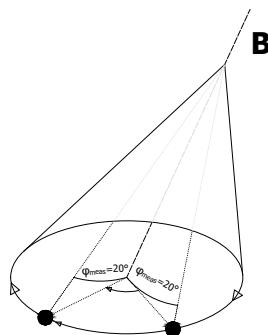
Další řešení, které se nabízelo, bylo zjištění náklonu za pomocí vektoru magnetické indukce. Pro rozsahy vzdáleností, ve kterých se sonda pohybuje, můžeme uvažovat směr vektoru magnetické indukce za konstantní a tedy podle něj určit náklon sondy viz. obr. 4.11. Na začátku měření je potřeba změřit úhel, kterým vektor magnetické indukce směřuje. Následně pro náklon sondy platí

$$\varphi = \varphi_{\text{meas}} - \varphi_{\text{ref}}. \quad (4.3)$$



Obrázek 4.11: Měření náklonu sondy pomocí vektoru magnetické indukce

Tento způsob výpočtu náklonu sondy bohužel funguje pouze ve 2D. Pokud se přesuneme do 3D prostoru, narazíme na následující problém. Při rotaci kolem vektoru magnetické indukce se měřené hodnoty se nebudou měnit, jak je znázorněno na obr. 4.12. Tento způsob by šlo použít pouze v případě, že by vektor magnetické indukce směroval svisle k zemi. Při obecné orientaci bohužel tato metoda využít nejde.



Obrázek 4.12: Rotace sondy kolem osy tvořené vektorem magnetické indukce (pohled zespod)

Pro zjištění náklonu je využita první zmíněna metoda. Jelikož není možné zjistit okamžitou výchylku, ale pouze maximální výchylku za dobu jedné periody GPS přijímače, bylo počítáno se standartním rozkmitem sondy, jehož hodnota se bere jako konstatní po celou dobu letu.

■ 4.4 Realizace pozemní stanice

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2.5, úkolem pozemní stanice je překládat přijímaná data zpět do formátu NMEA GPGGA zprávy, určené pro tracker. Rozdělení příchozí zprávy vyslané sondou probíhá obdobně jako v sondě. Přijatá data jsou znak po znaku

iterována a zkoumá se, jestli se nenarazilo na oddělovací znak - v tomto případě středník viz ukázka kódu 4.7. Pro samotný příjem dat nelze jako v sondě využít funkce, která přijímá, dokud nenastane prodleva. Vysílací modul sám posílá data po 30 znacích a i mezi těmito balíky dat je prodleva. Zpráva se tedy musí načítat znak po znaku, jak je ukázáno v kódu 4.6, a jako konec zprávy brát až znak "\n".

```

1 uint8_t buff = 0;           //buffer pro aktualne prijaty znak
2 uint8_t rx[1000] = {};     //buffer pro aktualne prijimanou zpravu
3
4 while(buff != '\n'){ //dokud neprijde konec zpravy
5     HAL_UART_Receive(&huart1, &buff, 1, 4000);
6     rx[len] = buff; //ulozeni znaku do aktualne prijimaneho bufferu
7     len++;
8 }
```

Ukázka kódu 4.6: Příjem dat pozemní stanicí

```

1 uint8_t framelen[10] = {};//pozice v aktualnim poli
2 uint8_t frame[10][13] = {};//buffer pro data rozdelena do
   jednotlivych poli
3
4 for(int i = 0; i< len; i++){
5     if(rx[i] != ';'){ //pokud znak neni oddelovaci
6         frame[n][framelen[n]] = rx[i]; //do bufferu se ulozi aktualni
   znak
7         framelen[n]++;
8     }
9     else{
10        n++;
11        framelen[n] = 0; //vynulovani pozice v tomto poli
12    }
13 }
```

Ukázka kódu 4.7: Rozdělení příchozí zprávy do jednotlivých polí

Jelikož některé informace, které \$GPGGA zpráva obsahovala, nebyly přeneseny telemetrií, musely být na zemi doplněny. Pro tracker nicméně nejsou důležité a tudíž mohly být jakékoliv. Jedná se o jednotky, odchýlení od geoidu a HDOP - Horizontal Dilution of Precision (Horizontální zředění přesnosti), viz tabulka 4.6. Poslední pole, obsahující kontrolní součet muselo být spočítáno podle údajů posílaných do trackeru. Kontrolní součet je podle (<https://nmeachecksum.eqth.net/>) logický XOR všech znaků mezi znaky \$ a *. Funkce pro výpočet kontrolního součtu je ukázána v kódu 4.8.

```

1
2 uint16_t xor = 0;
3 for ( uint8_t i = 1 ; i < cpypos ; i ++ ) {
4     xor = xor ^ tx[i]; //XOR mezi aktualnim znakem a predeslym vysledkem
5 }
6
7 uint8_t checksum[2] = {};
8 itoa(xor, checksum, 16); //prevod kontrolniho spouctu do hexadecimalniho
   textoveho formatu
9 if((checksum[0]>96) && (checksum[0]<123)) checksum[0] ^=0x20; //zmena z
   malych pismen na velka
```

```
10 if((checksum[1]>96) && (checksum[1]<123)) checksum[1] ^=0x20;
```

Ukázka kódu 4.8: Výpočet kontrolního součtu

Tabulka 4.6: Formát GPGGA zprávy

Název	Příklad	Jednotky	Popis
Identifikátor zprávy	\$GPGGA		GGA hlavička
UTC Čas	132456		hhmmss.sss
Zem. Šířka	5005.77089		ddmm.mmmm
N/S (Sever/Jih)	N		
Zem. Délka	1421.46534		dddmm.mmmm
E/W (Východ/Západ)	W		
Druh určení pozice	1		0 data nejsou validní 1 data jsou validní 2 diferenciální GPS
Počet využitých satelitů	5		
HDOP	1.79		
Nadmořská výška	294	metry	
Jednotky	M	metry	
Odhýlení od geoidu	44.4	metry	Separace geoidu a elipsoidu
Jednotky	M	metry	
Stáří rozdílové korekce	-	sekundy	
Diff. Ref. Station ID	-		
Kontrolní součet	*5D		
<CR> <LF>			Konec zprávy

4.5 Software pro zobrazení telemetrických údajů

Příjem dat samotných byl realizován stejným modulem, který je umístěn v sondě, určený k posílání telemetrických dat. Pro minimalizaci ztrát byla anténa s modulem umístěny na platformě, která byla pomocí magnetů uchycena na střeše automobilu. K modulu byl připojen převodník ze sériové linky na USB, který byl dostatečně dlouhým USB kabelem připojen k laptopu spolujezdce.

Zpracování telemetrických údajů pro zobrazení pozice sondy na mapě, výpis výšky sondy a teploty okolí probíhá v Python skriptu. Ten čte skrze sériovou linku data jdoucí z radiopřijímače. Data jsou přijímaná do bufferu a následně rozdělena podle dělících znaků viz kód 4.9.

```
1 def getNewData(self):
2     try:
3         new_data = self.handler.readline().decode(encoding="UTF-8")
```



Obrázek 4.13: Anténa na příjem dat pro vykreslování pozice na mapě

```

4     except UnicodeDecodeError:
5         print("Couldn't parse new data")
6         return None
7     if new_data == "\n":
8         return None
9
10    parsed = []*24
11    parsed = new_data.split(sep=";")
```

Ukázka kódu 4.9: Blok kódu pro příjem a rozdelení telemetrických údajů

Informace o poloze jdoucí z GPS senzoru nelze rovnou využít pro zobrazení pozice na mapě. Formát souřadnic, který posílá GPS přijímač, je ve stupních a minutách – DDMM.MMMM DDDMM.MMMM viz tabulka 4.3. Pro zobrazení souřadnic pomocí *gmpplot* je nutné souřadnice převést do formátu desetinných stupňů DD.MMMM DDD.MMMM. Tento převod je proveden následovně. První dvě resp. tři číslice ze zeměpisné šířky resp. délky se ponechají a reprezentují DD resp. DDD v novém formátu. Zbylé číslo ve formátu MM.MMMM se vydělí 60. Výsledek se dosadí za desetinnou tečku. Algoritmus pro převod v jazyce Python je znázorněn v kódu 4.10.

```

1     latitude = int(latitude_str[:2]) + float(latitude_str[2:]) / 60
2     longitude = int(longitude_str[:3]) + float(longitude_str[3:]) / 60
```

Ukázka kódu 4.10: Převod formátu GPS souřadnic

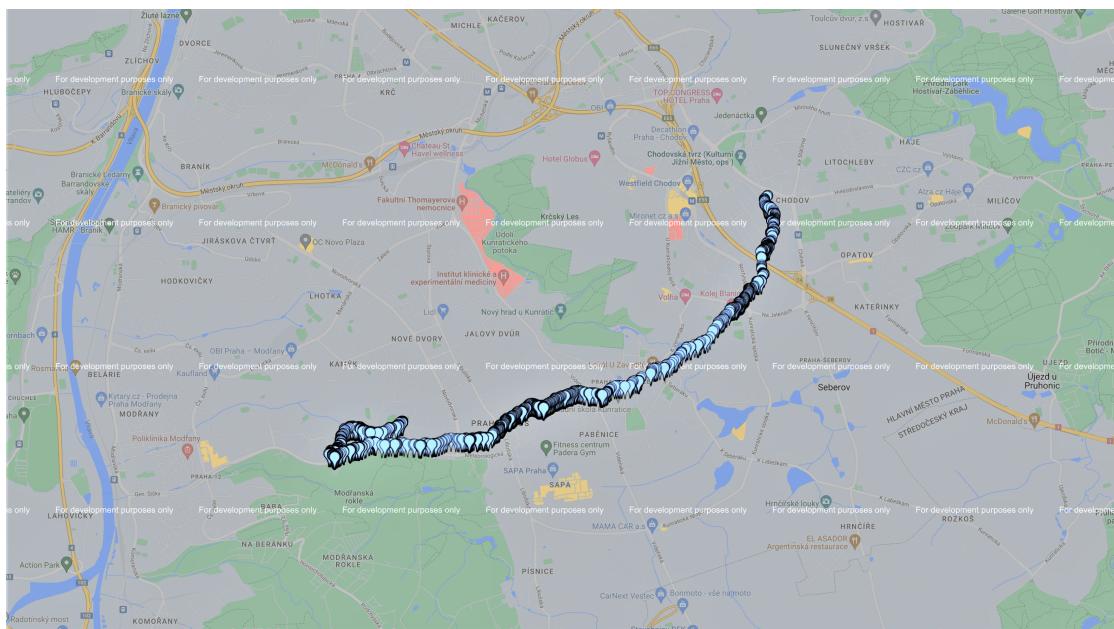
Zobrazení souřadnic na mapě je provedeno pomocí modulu *gmpplot* [27]. Ukázka kódu 4.11 ukazuje způsob inicializace modulu a zobrazení souřadnic sondy na mapě. Vzniklý soubor

4. Realizace systému

`my_map.html` lze otevřít v běžném prohlížeči. Vizualizace přijatých GPS souřadnic je na obr. 4.14.

```
1 from gmpplot import gmpplot
2
3 def main():
4     gmap = gmpplot.GoogleMapPlotter(50.1414537, 14.6213022, 11.94)
5
6     while True:
7         # -- Kod pro ziskani novych dat -- #
8
9         # Vykreselni novych dat na mapu
10        gmap.marker(latitude, longitude, 'cornflowerblue')
11        gmap.draw("my_map.html")
```

Ukázka kódu 4.11: Příklad zobrazení GPS souřadnic



Obrázek 4.14: Trajektorie letu zobrazena pomocí python skriptu 4.11

4.6 Testování a měření

Před samotným vypuštěním bylo zapotřebí sondu otestovat. Jak spolehlivost elektroniky v nízkých teplotách, tak přenos telemetrických údajů na velkou vzdálenost. Pro korektní zpracování dat bylo také zapotřebí změřit směrovou charakteristiku antén a do jaké míry obal sondy tuto charakteristiku ovlivňuje.

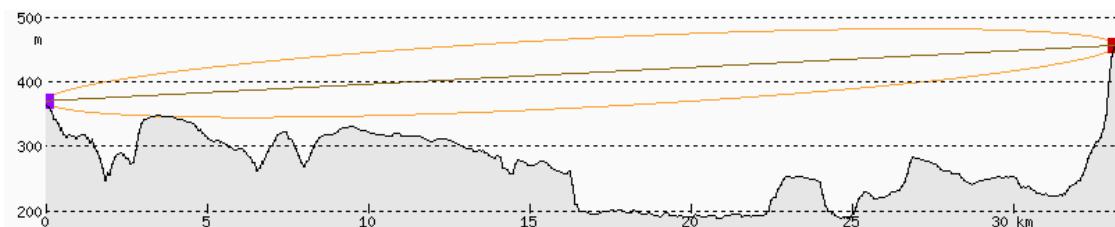
Ověření funkčnosti sondy při nízkých teplotách bylo provedeno v klimakomoře na katedře elektrotechnologie. Díky rázovému schlazení lze do jisté míry simulovat časový průběh

teploty okolí, ve kterém se sonda pohybuje. Sonda byla umístěna do klimakomory 4.15 za pokojové teploty a schladená na -55 °C. Při této teplotě byla následně ponechána 20 minut a byla sledována funkčnost elektroniky.



Obrázek 4.15: Sonda umístěna v klimakomoře

Pro ověření dosahu radiového spoje byl přenos dat nejdříve vyzkoušen na zemi. Vysílací část spoje se nacházela na střeše panelévého domu na Petřinách. Příjem probíhal na hoře Říp. Radiový spoj byl realizován na přímou viditelnost a nebyla zakryta 1. Fresnelova zóna, jak je vidět profilu zemského povrchu na obr. 4.16. Testování ukázalo bezchybný přenos dat ze sondy.



Obrázek 4.16: Profil trasy mezi Prahou a horou Říp, vykresleno pomocí [26]

Kapitola 5

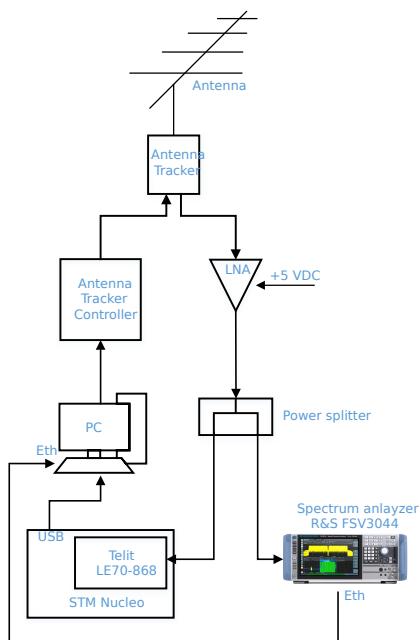
Experiment

V následující kapitole je popsán průběh experimentu od přípravy až po nález sondy. Dále jsou zobrazena surová data ze sondy a ze spektrálního analyzátoru a popsáno jejich čištění, aby bylo možné je dál používat při zpracování. Anténa použitá pro příjem dat byla stejného typu jako na sondě. Umístěna byla na střeše budovy FEL v Dejvicích na anténním sledovači (obr. 5.1b), který upravoval orientaci podle polohy cíle - sondy. Ze střechy vedl koaxiální kabel do místnosti, kde byl signál rozbočovačem rozdělen do spektrálního analyzátoru a radiového přijímače v pozemní stanici. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 5.1a.

5.1 Průběh experimentu

Po přichycení sondy ČHMÚ byla sonda zapnuta a vyčkáno na zjištění GPS pozice. Poté byl pracovníky ústavu napuštěn balón o hmotnosti 1200 g, do kterého byl předem vložen padák. Přesně v 13:15:20 SELČ byl balón se sondami vypuštěn. Ihned po startu byly vidět telemetrické údaje o pozici a výšce a byla vykreslována trajektorie letu na mapě. Přibližně po patnácti minutách jsme nasedli do automobilu a vyrazili na místo, kde byl predikován dopad sondy.

Po 27 minutách letu bylo vysílání telemetrických údajů přerušeno. Podle posledních zaznamenaných údajů se tak stalo v 13:42:53 při teplotě -40 °C v nadmořské výšce 9650.3 m. Sonda již nezačala po dobu letu vysílat. Pozice dopadu byla následně zjištěna podle pozice, kterou vysílala sonda ČHMÚ. Její vysílaná data jsou dekódována radoamatéry



(a) : Schéma pozemního segmentu



(b) : Anténní sledovač

Obrázek 5.1: Pozemní segment

a zveřejňována na internetu. Po určení pozice sondy ČHMÚ byla nalezena i má sonda a to o 50 m jihozápadně. Toto bylo dánou 50m provázkem mezi sondami a směrem větru.



(a) : Sonda visící na stromě



(b) : Sonda a dron použitý k jejímu sundání

5.2 Naměřená data

Jak bylo zmíněno v kapitole o firmwaru sondy, program byl ošetřen několika způsoby, díky kterým se sonda restartovala, pokud nastal nějaký problém. Z dat na SD kartě je

patrné, že cyklus čtení dat někdy zachytí příjmanou zprávu z GPS v takové fázi, že neodpovídala předepsanému formátu a tedy nebyla do daných polí uložena odpovídající data. Jestliže se sonda z nějakého důvodu restartuje, inicializace senzorů stvá delší dobu, než je perioda posílání dat. Tedy se může stát, že v momentě, kdy je sonda připravena přijímat GPS data je již GPS přijímač posílá a tedy příjem začne uprostřed posílané zprávy. Příklad chybného formátování dat je např.:

```
SA2512.005000.34466N01426.89992ED-002.740066821-03.5;037.9;N;29.868;77
```

Z tučně zvýrazněných dat jsou poznat minuty sekundy a milisekundy a souřadnice sondy.

Tato data jsou dále nepoužitelná a proto bylo potřeba rádky, které je obsahovaly, odstranit. Odstanění poškozených rádků proběhlo následujícím *UNIX*ovým příkazem provedeným v terminálu, který vybere všechny rádky, obsahující jednu ze dvou následujících posloupností znaků.

```
1 grep '00;;;;;;\|00;50' raw_data.txt > data_clean.txt
```

Tedy buď nulové milisekundy a prázdná pole o poloze, a nebo nulové milisekundy a první dvě číslice zeměpisné šířky, která se při pohybu sondy s ohledem na dolet nemění. Níže je příklad neporušených zpráv a vyznačeno je kontolované místo zprávy. Data ze spektrálního

```
110225.00;;;;;;+029.21;0097759;+28.2;027.7;0;05;4.46;3.46;2.82;8305;-1120;1644;8320;
-7;235;148;-52;10;17;
110226.00;500.41136;N;01426.85498;E;257.1;0.264;+029.20;0097766;+28.3;027.6;1;05;
4.46;3.46;2.82;8304;-1120;1662;8286;3;233;147;-29;14;45;
```

analyzátoru byla ukládána ve formátu *numpy* a obsahovala časovou značku a přijatý výkon. Čas byl ve formátu epoch. Ten udává aktuální čas v sekundách uplynulých od 1. ledna 1970. Například čas vypuštění v epoch formátu je 1651662920.0000. Tento formát byl převeden po načtení souboru v programu Matlab příkazem

```
1 datetime(powerData(:,1), 'convertfrom', 'posixtime').
```

Čas ve formátu epoch (s)	Přijatý výkon (dBm)
1651662920.1542	-77.4421920776
1651662922.1421	-78.0411224365
1651662924.1554	-84.5278778076
1651662926.1552	-82.4575865586
...	...

Tabulka 5.1: Surová data času a výkonu změřeného spektrálním analyzátorem

Kapitola 6

Výsledky

Tato kapitola se věnuje zpracování naměřených dat v programu Matlab. Před samotným zpracováním bylo také potřeba data upravit tak, aby se z nich daly vykreslovat grafy. Například převést časové údaje ukládané s daty na časový formát Matlabu. Díky nim se z dat daly vytvořit časové tabulky *timetable*, které šlo posléze spojit dohromady právě na základě časových údajů u jednotlivých měření.

6.1 Výstup z experimentu

Výpočet refraktivity troposféry byl proveden podle doporučení ITU-R P.453 [4]. Refraktivitu v závislosti na podmínkách prostředí lze přibližně vyjádřit jako

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right), \quad (6.1)$$

kde T je absolutní hodnota v K, p je atmosférický tlak v hPa a e je tlak vodních par v hPa. Ten lze vypočít pomocí hustoty vodních par z doporučení ITU-R 836 [3]. Pdle [4] lze tlak vodních par vypočítat také podle relativní vlhkosti vzduchu H jako

$$e = \frac{H}{100} 6,1121 e^{\frac{17,502t}{240,97+t}}, \quad (6.2)$$

kde t je teplota v °C. Vztah platí v rozsahu teplot od -20 °C do 50 °C [1].

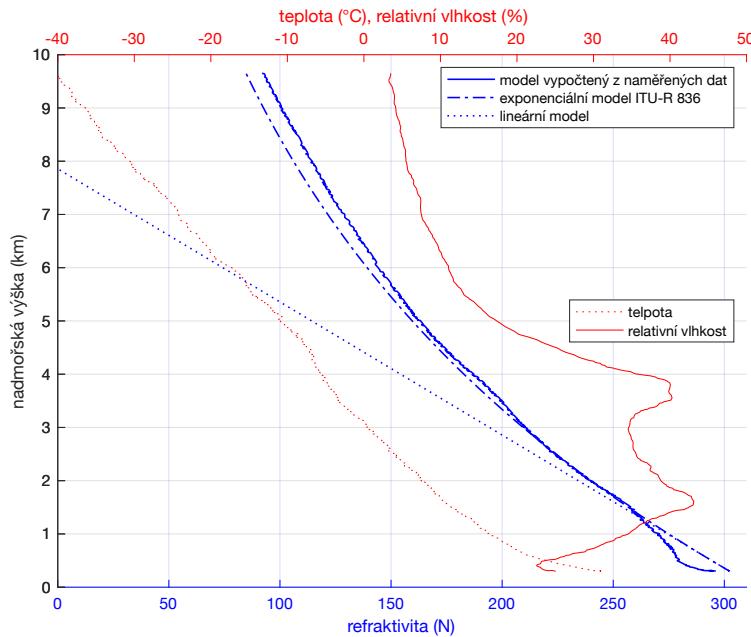
Pro approximaci výškového profilu refraktivity ITU doporučuje [4] exponenciální model podle vztahu:

$$N = N_0 e^{-h/h_0}, \quad (6.3)$$

6. Výsledky

kde h je výška nad zemí, N_0 hodnota refraktivity v 0 km a h_0 výškové měřítko v km. ITU udává globální světový průměr $N_0 = 315$ N a $h_0 = 7,35$ km [1].

V grafu na obrázku 6.1 je vynesen model vypočtený z měřených dat, doporučený exponenciální model a lineární model podle [1].



Obrázek 6.1: Výškový profil refraktivity

Data refraktivity vypočtené pomocí (6.1) byla proložena exponenciální funkcí viz obr. 6.2. Výpočet koeficientů byl proveden pomocí funkce v Matlabu `fit(alt,N,'exp1')`, kde `alt` je vektor nadmořských výšek v metrech a `N` je vektor vypočtených refraktivit pro dané nadmořské výšky.

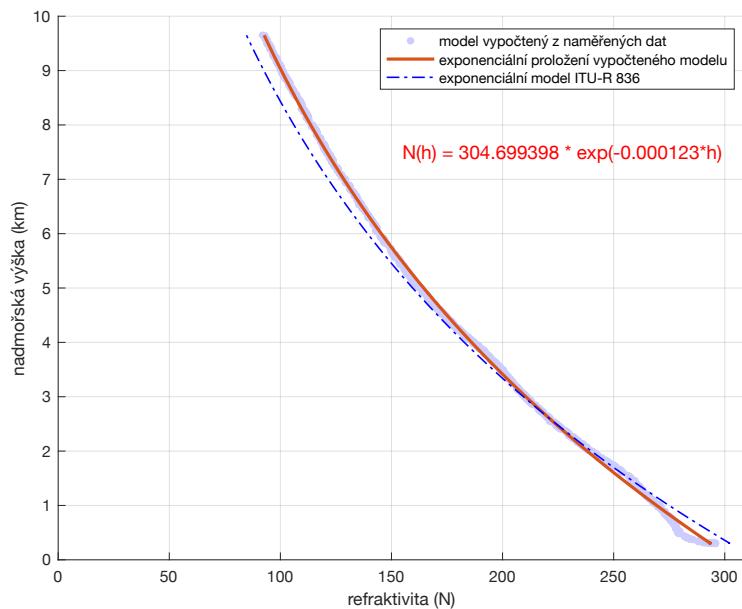
Výsledná proložená funkce ve tvaru $y = a \exp(b x)$ vyšla jako

$$N(h) = 304,7 e^{-0,000123 h}. \quad (6.4)$$

Z naměřených dat vychází hodnota refraktivity v 0 km jako $N_0 = 304,7$ N. Porovnáním exponentů z (6.3) a (6.4) dostaneme

$$\begin{aligned} -h/h_0 &= -0,000123 h \\ h_0 &= 1/0,000123 \text{ m} \\ h_0 &= 8130,1 \text{ m}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Hodnota výškového měřítka vyšla z proložení dat $h_0 = 8,13$ km.

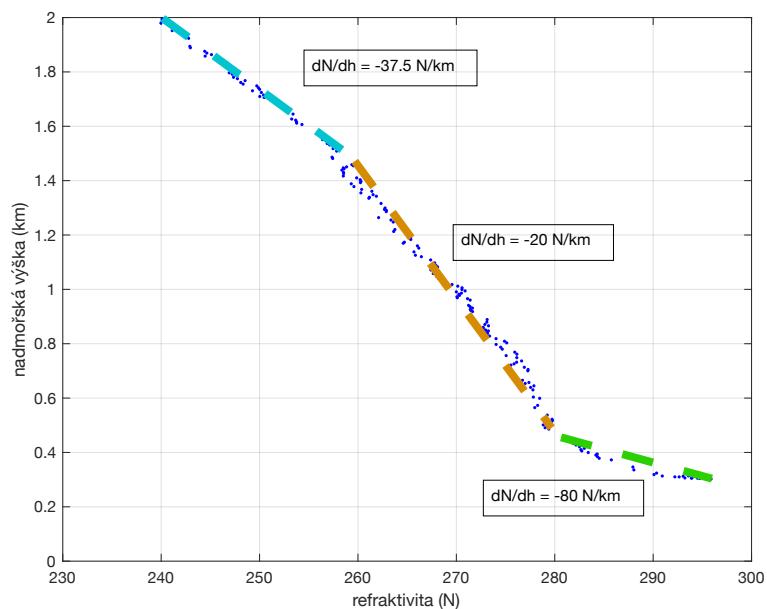


Obrázek 6.2: Proložené hodnoty refraktivity exponenciální křivkou

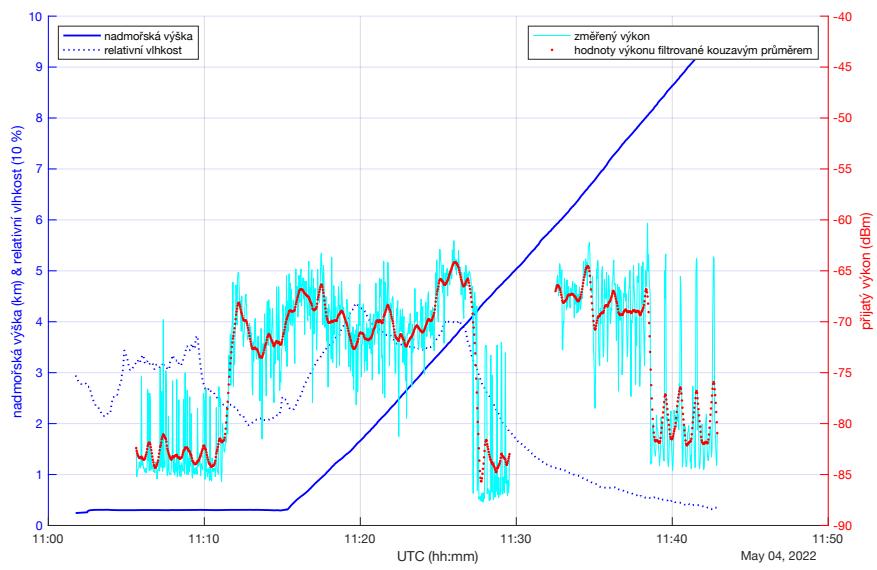
Data o přijatém výkonu anténou bohužel nelze použít. Jak bylo po dokončení experimentu zjištěno, při komunikaci anténního sledovače a jeho řídící jednotky došlo k rušení a příjimací anténa se začala nepředvídatelně natáčet. Toto je vidět na obr. 6.4, kdy zcela bez jakýchkoliv výrazných změn okolního prostředí došlo k prudkémnu poklesu signálu. Šlo o moment, kdy se anténa vlivem rušení v komunikaci natočila jiným směrem, než byla sonda. Bohužel vinou tohoto chování sledovače není možné data použít k ověření ztrát způsobenými šířením ve volném prostoru a ztrá způsobenými refraktivitou atmosféry.

Jelikož v tomto případě není přijatý výkon téměř vůbec závislý na vzdálenosti sondy a pozemního segmentu, nebudou takto data ani interpretována. Zobrazena jsou v grafu na obr. 6.4.

6. Výsledky



Obrázek 6.3: Profil refraktivity pro první dva kilometry a proložení lineárními přímkami



Obrázek 6.4: Průběh výkonu přijatého spektrometrem, výšky sondy a vlhkosti okolí v čase

Kapitola 7

Závěr

■ 7.1 Shrnutí experimentu

V rámci práce vznikla sonda schopná měřit podmínky ve stratosféře a vybraná data posílat na pozemní stanici. Bylo zařízeno její vypuštění pod záštitou ČHMÚ a po dopadu byla sonda opět nalezena. Dále vzniky podpůrné jednotky určené pro příjem dat ze sondy a jejich zpracování v reálném čase.

I přes testování sondy v nízkých teplotách, panujících ve vyšších vrstvách zemské atmosféry, bylo posílání a zapisování dat zastaveno. Nicméně naměřená data do 10 km stačila pro vytvoření modelu refraktivity využitelného při plánování radiového spoje.

Anténní sledovač použitý pro sledování sondy ze střechy FEL v Dejvicích bohužel znehodnotil měřená data (spektrum přijímaného signálu). Vinou rušení mezi řídicím boxem a elektronikou zodpovědnou za otáčení antény, došlo k náhodným otáčením antény a příjem signálu v nespecifikovaném bodě směrové charakteristiky antény.

Data naměřena sondou byla využita při tvorbě výškového gradientu refraktivity a ten byl porovnán s doporučeným exponenciálním modelem podle [4]. Koeficienty doporučeného modelu byly porovnány s koeficienty exponenciálního položení modelu vznikým v rámci této práce. Odchylka od standardně udávaných koeficientů exponenciálního modelu byla 10 % pro výškové měříto h_0 a 3 % pro hodnotu refraktivity v 0 km N_0 .

■ 7.2 Možná vylepšení

Hlavním problémem po elektronické stránce bylo využití senzorů ve formě modulů a ne jako čipů samotných. Nemožnost zkrátit zbytečně dlouhé napájecí přívody k integrované obvody a dlouhé komunikační cesty mohly mít za následek celkovou nefunkčnost sondy. Jsou to nicméně problémy, které se mohou objevit jen za velmi specifických podmínek a testování je nemusí odhalit. V dalším vývoji je proto zcela logické již dělat samotné DPS, které bude obsahovat všechny komponenty potřebné pro správné fungování sondy a zároveň provést důkladnější testování celé elektroniky.

Software byl založen na HAL knihovnách od firmy *STMicroelectronics*. Ty jsou dobré pro jednoduché programy, nicméně jejich omezená dokumentace znemožňuje tvorbu bezpečného kódu. Psaní kódu na úrovni registrů je tedy jedna z cest, jak zajistit bezpečný kód s předvídatelným chováním. Takový kód nicméně vyžaduje hlubší povědomí o programování mikroprocesorů. Jedná se o možné vylepšení další verze sony.

Pro přesné určení bodu, kterým anténa směřovala na pozemní segment je potřeba kombinace dat z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Byla zmíněna metoda *Kalmánova filtru*. Díky tomu by se nemuselo počítat s typickým rozkmitem, ale v daný moment relativně přesně určit směrování sondy. *Kalmánův filtr* se běžně využívá například v dronech a některé řídící algorytmu mají otevřený kód, který lze použít pro inspiraci.

Vstup řídícího softwaru sondy spoléhá na přicházející data z GPS přijímače a každou sekundu s jejich příchodem provede odečtení dat, jejich zpracování a poslání a uložení na SD kartu. V případě, že odpojíme GPS přijímač, nebudou odečítány žádné hodnoty. Zlepšení vidím v nezávislosti posílaní dat na GPS přijímači.

Jako poslední místo na zlepšení vidím vyřazení dosavadního anténního sledovače z pozemního segmentu a využití všeobecné antény s fixním úchytem. To ale pouze za předpokladu přítomnosti úzkopásmového

Všechna tato vylepšení mají své místo v další revizi sondy a její periferií kolem ní. Jsou ideálním začátkem pro další práci v tomto oboru.

Příloha A

Literatura

- [1] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [2] *Atmospheric Structure* [online] <https://www.albany.edu/faculty/rgk/atm101/structur.htm> [cit. 2022-05-19]
- [3] ITU-R Rec. P.836, *Water vapour: surface density and total columnar content*, Geneva, [online] https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.836-6-201712-I!!PDF-E.pdf [cit. 2022-05-19]
- [4] ITU-R Rec. P.453, *The radio refractive index: its formula and refractivity data*, Geneva, [online] https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-14-201908-I!!PDF-E.pdf [cit. 2022-05-19]
- [5] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The art of electronics*. Third edition. New York: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0-521-80926-9.
- [6] *Tracking a Weather Balloon* <https://www.highaltitudescience.com/pages/tracking-a-weather-balloon> [cit. 2022-05-19]
- [7] *Vyhľáška o technických a provozních podmínkách amatérské radiokomunikační služby*, [online] <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-156#cast1> [cit. 2022-05-19]
- [8] *Spot Trace User Guide* https://www.findmespot.com/downloads/SPOT_TRACE_User_Guide.pdf [cit. 2022-05-19]
- [9] *LMR33630 Datasheet* https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr33630.pdf?ts=1652260993140&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F [cit. 2022-05-19]

A. Literatura

- [10] *Code of Federal Regulations* <https://www.ecfr.gov/current/title-22/part-121>
- [11] *u-blox 7 Receiver Description* [https://www.u-blox.com/en/ubx-viewer/view/u-blox7-V14_ReceiverDescriptionProtocolSpec_\(GPS.G7-SW-12001\)_Public](https://www.u-blox.com/en/ubx-viewer/view/u-blox7-V14_ReceiverDescriptionProtocolSpec_(GPS.G7-SW-12001)_Public)
- [12] *U-Blox SAM-M8Q Datasheet* https://content.u-blox.com/sites/default/files/SAM-M8Q_DataSheet_%28UBX-16012619%29.pdf [cit. 2022-05-19]
- [13] *DHT22 Click datasheet* <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3721/AM2320.pdf>
- [14] *MPU9250 Register Map* <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/RM-MPU-9250A-00-v1.6.pdf> [cit. 2022-05-19]
- [15] *MPU9250 Datasheet* <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf> [cit. 2022-05-19]
- [16] *AM2320 Datasheet* <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3721/AM2320.pdf> [cit. 2022-05-19]
- [17] *MS5607 Datasheet* https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5607-02BA03%7FB2%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5607-02BA03_B2.pdf%7FCAT-BLPS0035 [cit. 2022-05-19]
- [18] *LDO 1117-3v3 Datasheet* <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ld1117.pdf> [cit. 2022-05-19]
- [19] *Energizer ultimate lithium Datasheet* <https://data.energizer.com/pdfs/192.pdf> [cit. 2022-05-19]
- [20] *Nun ein wenig Information zu der Sonde RS41-SG* <https://www.qsl.net/oe1ffs/Sondenpage/RS41/RS41.html> [cit. 2022-05-19]
- [21] *Vaisala RS41 Datasheet* <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-RS41SGP-Datasheet-B211444EN.pdf> [cit. 2022-05-19]
- [22] *NMEA Reference Manual* <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual-Rev2.1-Dec07.pdf> [cit. 2022-05-19]
- [23] *MS5607 product page* <https://www.parallax.com/product/altimeter-module-ms5607/> [cit. 2022-05-19]
- [24] *Telit LE70-868 Datasheet* http://www.artbrno.cz/download/telit/Telit_LE70-868_Datasheet.pdf [cit. 2022-05-19]
- [25] *Altitude to pressure conversion* <https://www.sensorsone.com/altitude-pressure-units-conversion/> [cit. 2022-05-19]
- [26] <http://www.heywhatsthat.com/> [cit. 2022-05-19]
- [27] <https://github.com/gmplot/gmplot> [cit. 2022-05-19]

Příloha B

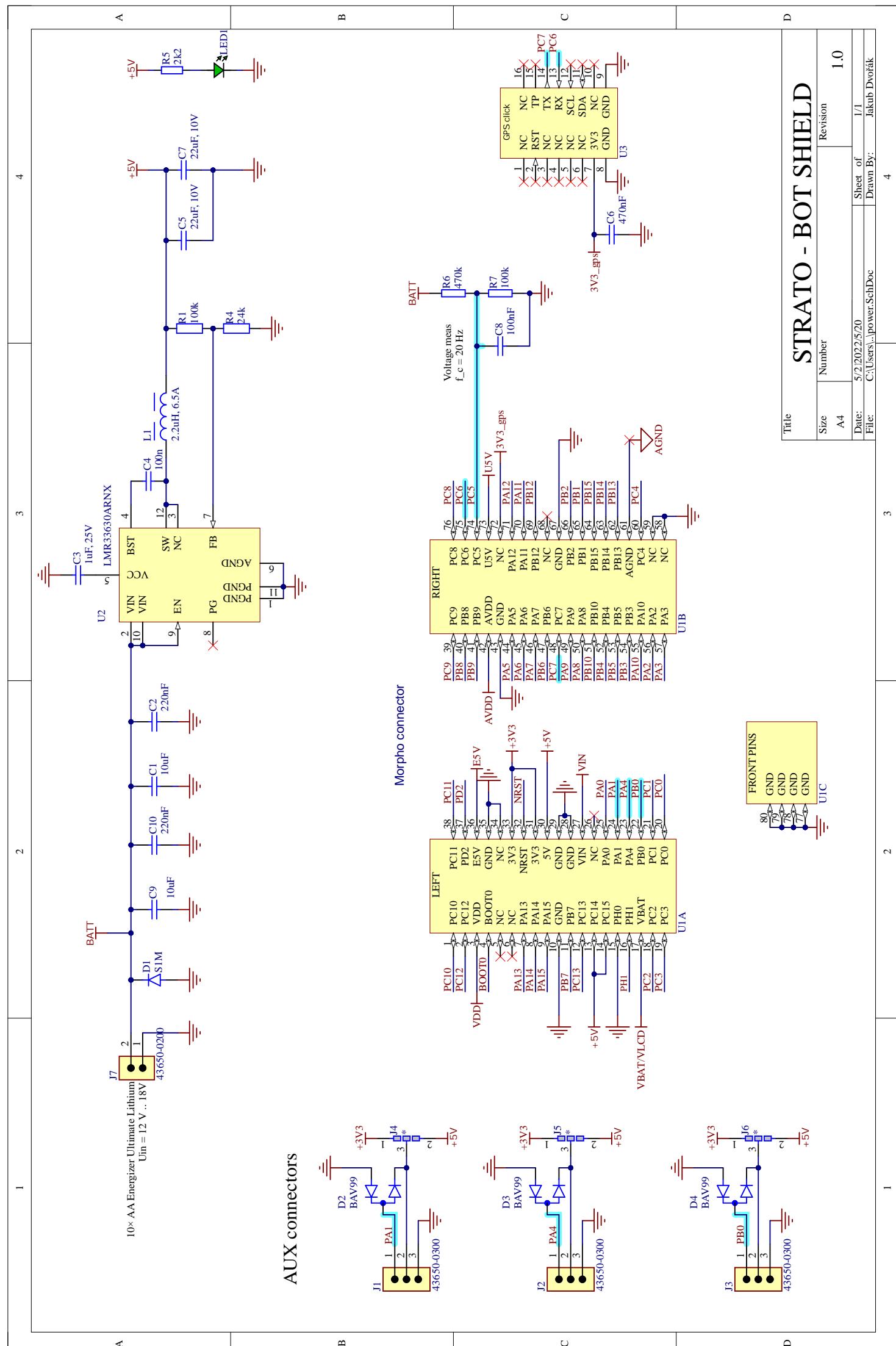
Seznam použitých zkratek

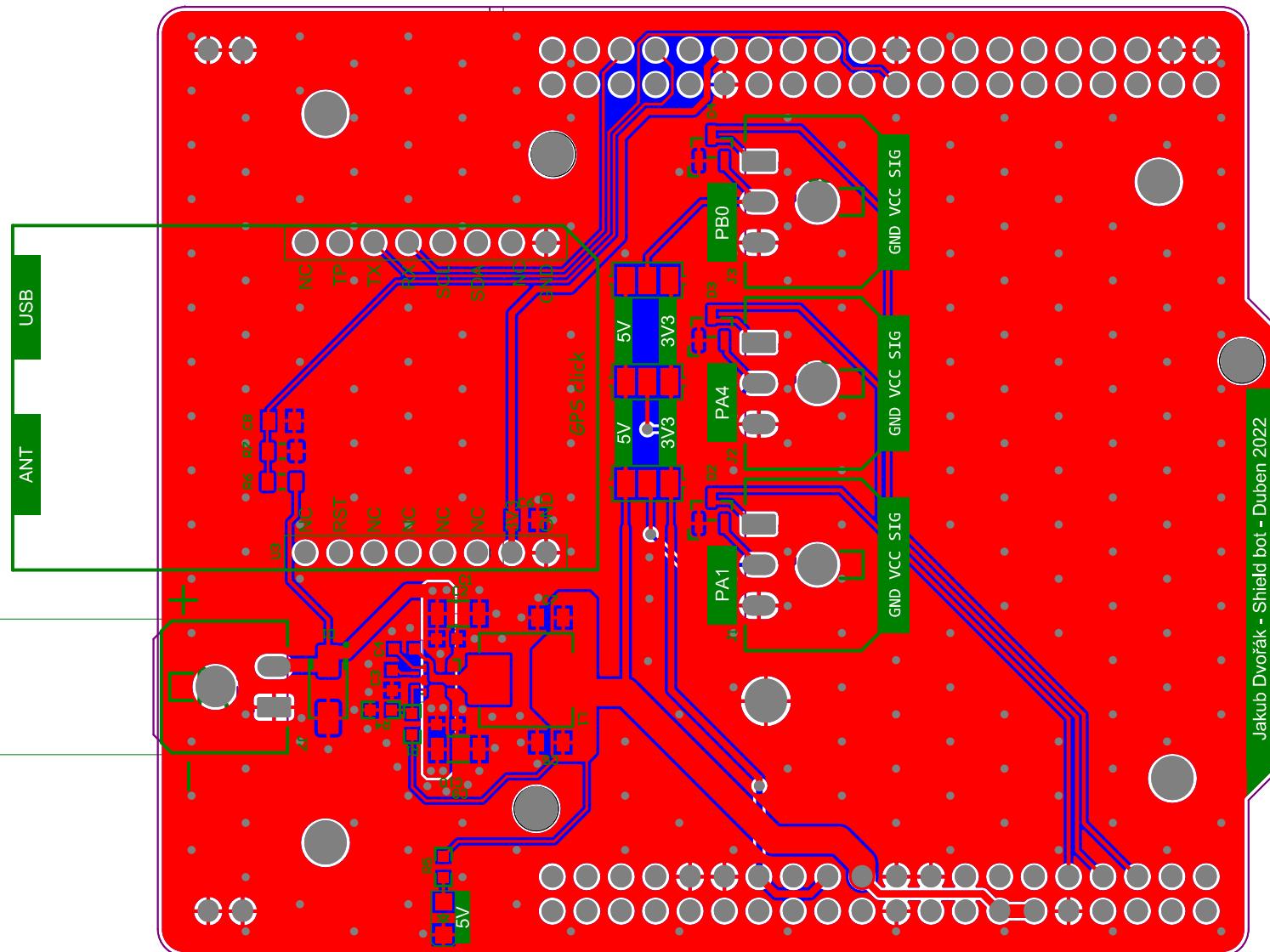
Zkratka	Význam zkratky
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DPS	Deska plošných spojů
FSL	Free space loss
GPIO	A general-purpose input/output
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communication
GNSS	Global Navigation Satellite System
HAL	Hardware Abstraction Layer
ITU	International Telecommunication Union
MEMS	Micro-electromechanical system
PSRR	Power Source Rejection Ratio
QHA	Quadrifilar Helix Antenna
SD	Secure Digital (SD karta)
TVS	Transient voltage suppressor
ESD	Electrostatic discharge

Příloha C

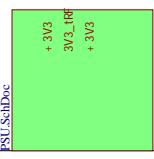
Schémata a desky plošných spojů

Níže jsou uvedena elektrická schémata a desky plošných spojů vznikých v rámci této práce. Součástí jsou také seznamy součástek použitých na těchto deskách.

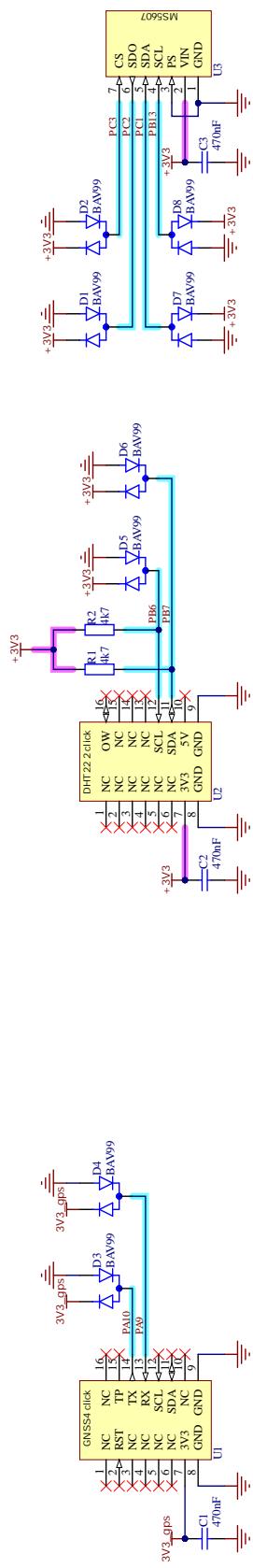




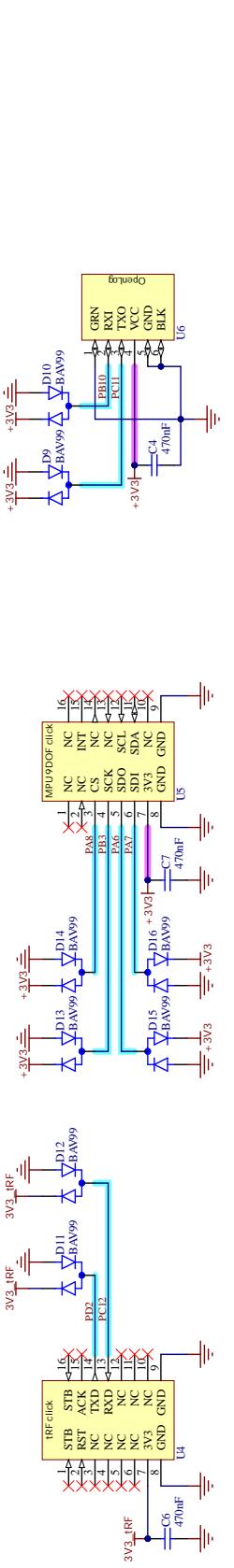
Item #	Designator	Description	Comment	Quantity	olumn Name Error: Manufacturer Part Nu	Footprint	LibRef	Note
1	C1, C9	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip Capacitor, General Purpose, size 1206, X5R, 10uF, .50V	10uF WCAP, General Purpose, size	2		WCAP-CSGP_1206_L3.2W1.6H1.6	8.85012E+11	
2	C2, C10	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip Capacitor, General Purpose, size 0603, X7R, .220nF, .50V	.220nF WCAP, General Purpose, size	2		WCAP-CSGP_0603_L1.6W0.8H0.8_Refow	8.85012E+11	
3	C3	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip Capacitor, General Purpose, size 0603, X7R, 1uF, .25V	1uF WCAP, General Purpose, size	1		WCAP-CSGP_0603_L1.6W0.8H0.8_Refow	8.85012E+11	
4	C4	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip Capacitor, General Purpose, size 0603, X7R, 100nF, .25V	100n WCAP, General Purpose, size	1		WCAP-CSGP_0603_L1.6W0.8H0.8_Refow	8.85012E+11	
5	C5, C7	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip 222uF, 10V Capacitor, General Purpose, size 0805, X5R, 1uF, .10V	222uF WCAP, General Purpose, size	2		WCAP-CSGP_0805_L2W1.25H1.25	8.85012E+11	
6	C6	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip 470nF Capacitor, General Purpose, size 0805, X7R, .470nF, .50V	470nF WCAP, General Purpose, size	1		WCAP-CSGP_0805_L2W1.25H1.25	8.85012E+11	
7	C8	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip 100nF Capacitor, General Purpose, size 0805, X7R, 100nF, .50V	100nF WCAP, General Purpose, size	1		WCAP-CSGP_0805_L2W1.25H0.8_Refow	8.85012E+11	
8	D1	Si; Si; 1000V; 1A; 1X;	SiM DIO(M5/127X23N(SM))	1		SiM DIO(M5/127X23N(SM))	ED-S1MX0	
9	D2, D3, D4	Con: Micro Fit 3.0; 3x; PCB; Right angle: 250V; 5A; Male; Tin: ??;	Micro Fit 3.0; 3x; PCB; Right angle: 250V; 5A; Male; Tin: ??;	3		SOT95P230X110-3N(SOT23) MOLEX_43650-0300XX0	BAV99 EJ-043650-0300XX0	
10	J1, J2, J3	WE-LHMI SMT Power Inductor, size 7030, 2.2uH, 6.5A	7030 WE-LHMI SMT Power Inductor, size 7030, 2.2uH, 6.5A	3		MOLEX_43650-0200XX0	EJ-43650-0200XX0	
11	J7	Con: Micro Fit 3.0; 2x; PCB; Right angle: 600V; 5A; Male; Nickel: ??;	Micro Fit 3.0; 2x; PCB; Right angle: 600V; 5A; Male; Nickel: ??;	1		WE-LHMI_7030	74437346022	
12	L1	green Thick film	green Thick film	1				
13	LED1	10000.00, 24000.00, 2200.00	10000.00, 24000.00, 2200.00	1		0805LED RES_0603	LEDG_0805 RES_100k_5%_0603, RES_24k_5%_0603, RES_2k_5%_0603	
14	R1, R4, R5	R:470K; 0.125W; 1%; 150V; Thick Film: ±100ppm/K; 1X.	R:470K; 0.125W; 1%; 150V; Thick Film: ±100ppm/K; 1X.	3		RES2012X06N(SMR0805)	ER+100k0.1WXXF ER+470k0.1WXXF	
15	R6	R:100K; 0.125W; 1%; 150V; Thick Film: ±100ppm/K; 1X.	R:100K; 0.125W; 1%; 150V; Thick Film: ±100ppm/K; 1X.	1		RES2012X06N(SMR0805)	ER+100k0.1WXXF	
16	R7	NUCLEO F466 MORPHO LEFT	NUCLEO F466 MORPHO LEFT	1		Nucleo_bot_pads LEFT	NUCLEO F466 MORPHO LEFT	
17	U1	IC: SiMPs Regulator/Controller; 3.8V; 36V; 1X;	IC: SiMPs Regulator/Controller; 3.8V; 36V; 1X;	1		QFN50P200X300X100-12N	EU+LMR33630ARNXXX0 3-A Synchronous Step-Down Voltage Converter	
18	U2	GPS Click - no legs	GPS Click	1			GPS Click	
19	U3							



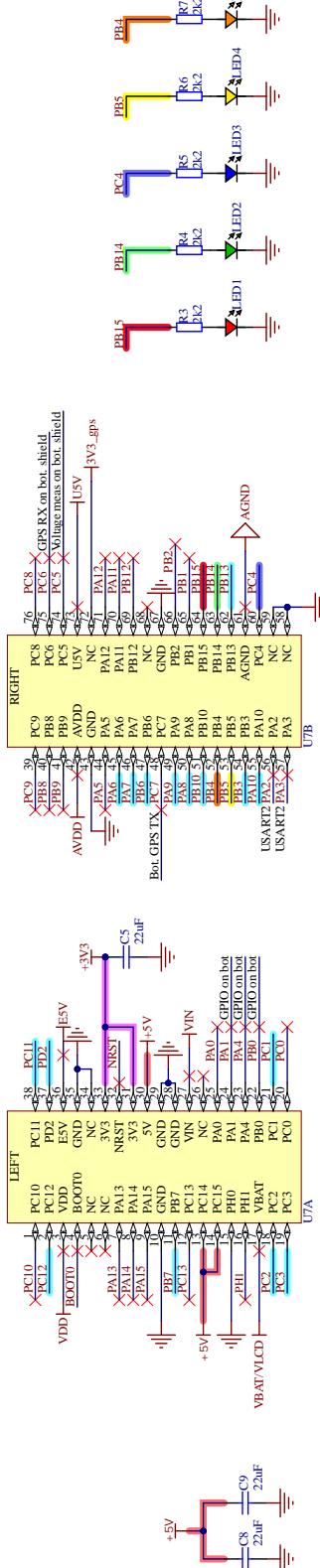
1



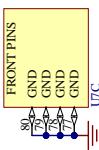
6



5



Morphoconnector



0

STRATO - TOP SHIELD - main			
Size	Number	Revision	1.0
A3			
Date:	2/22/20	Sheet of:	1/2
File:	C:\Users\main\SchDoc	Drawn By:	Jakub Dvořák
	7		8

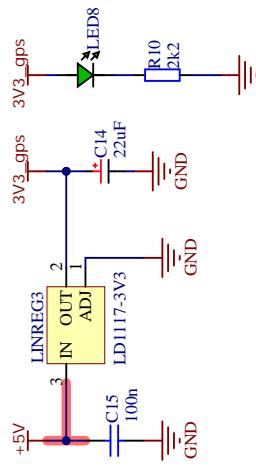
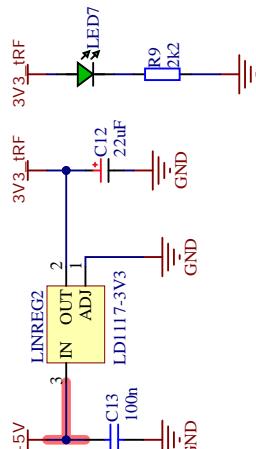
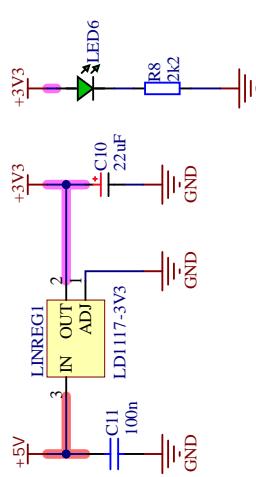
1

2

3

4

A



A

B

C

D

Title STRATO - TOP SHIELD - PSU

Size	Number	Revision
A4		1.0

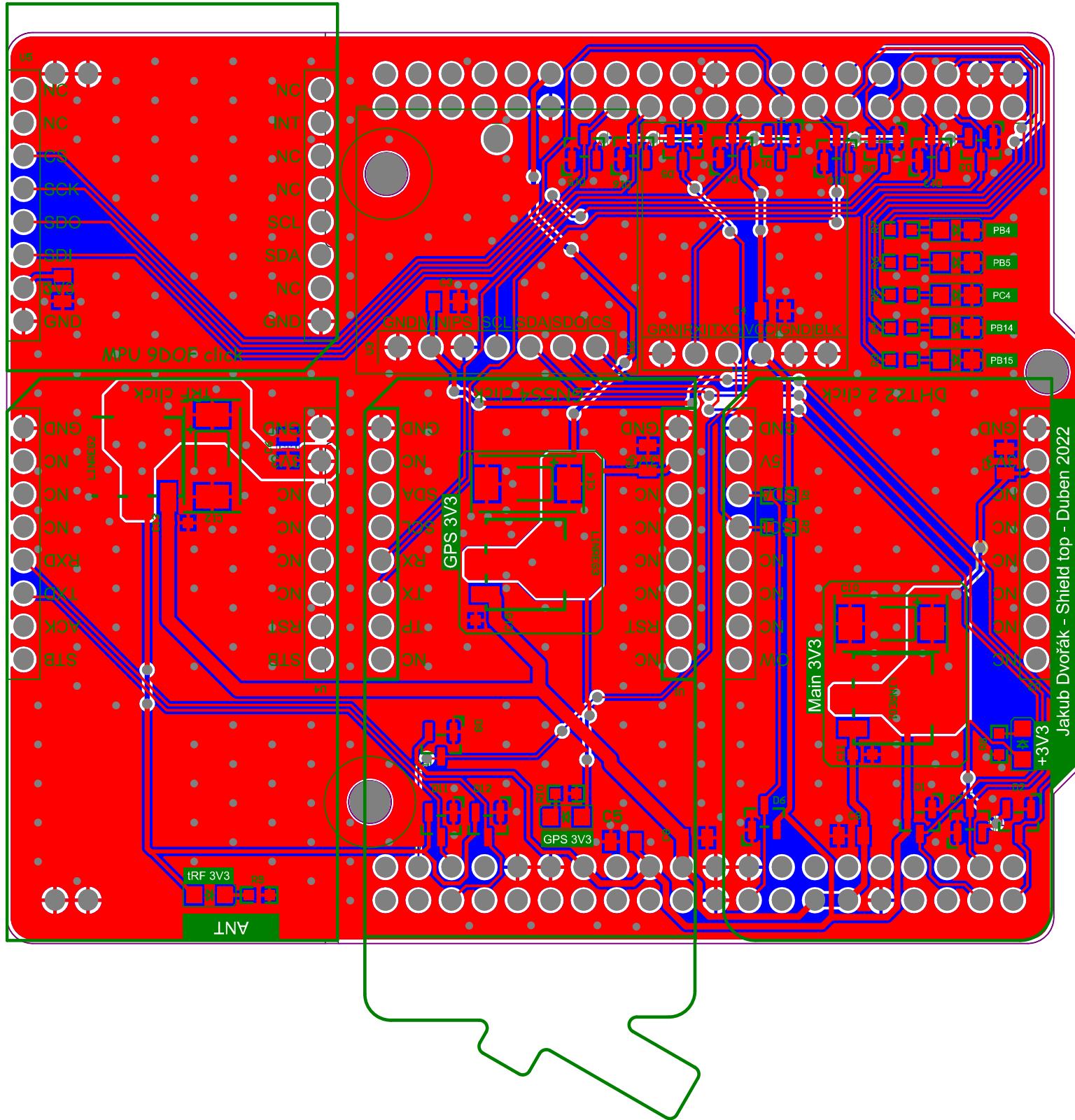
Date:	2022/5/20	Sheet of
File:	C:\Users\.\PSU.SchDoc	Drawn By: Jakub Dvořák

4

2

1

3



Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
470nF	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip Capacitor, General Purpose, size 0805, X7R, 470nF, 50V	C1, C2, C3, C4, C6, C7	WCAP-CSGP_H1.25	CSGP_0805_L2W1.25	885012207102
22uF	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip Capacitor, General Purpose, size 0805, X5R, 22uF, 10V	C5, C8, C9	WCAP-CSGP_H1.25	CSGP_0805_L2W1.25	885012107011
22uF	CAPT 22u 35V case-E total	C10, C12, C14	CAP E-CASE TANTAL	CAPT_22u_35V_E	3
100n	WCAP-CSGP Multilayer Ceramic Chip Capacitor, General Purpose, size 0603, X7R, 100nF, 25V	C11, C13, C15	WCAP-CSGP_H0.8_Reflow	CSGP_0603_L1.6W0.8885012206071R	3
BAV99		D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16	SOT95P230X110-3N(SOT23)	BAV99	16
red	LED1	LED1	0805LEDR	LEDR_0805	1
green	LED2, LED6, LED7, LED8	LED2, LED6, LED7, LED8	0805LEDG	LEDG_0805	4
blue	LED3	LED3	0805LEDB	LEDB_0805	1
yellow	LED4	LED4	0805LEDYell	LEDYell_0805	1
orange	LED5	LED5	0805LEDDora	LEDDora_0805	1
LD1117-3V3	15V 1A Adjustable low drop voltage regulator	LINREG1, LINREG2, LINREG3	SOT223	LINREG_ADJ_LM1117_DT	3
Thick film	4700.00, 2200.00	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	RES_0603	RES_4k7_5%_0603, RES_2k2_5%_0603	10
GNSS4 click		U1	GNSS4 click	GNSS4 click	1
DHT22 2 click		U2	DHT22 2 click	DHT22 2 click	1
MS5607		U3	MS5607	MS5607	1
tRF click		U4	tRF click	tRF click	1
MPU 9DOF click		U5	MPU 9DOF click	MPU 9DOF click	1
OpenLog		U6	OpenLog	OpenLog	1
NUCLEO F466 MORPHO LEFT		U7	Nucleo_bot_pads	NUCLEO F466 MORPHO LEFT	1

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **492178**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Přenos telemetrických dat z meteorologického balónu

Název bakalářské práce anglicky:

Telemetric Data Transmission from Meteorological Balloon

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte rádiový spoj mezi meteorologickým balónem a pozemním segmentem. Přenášená data z meteorologického balónu musí obsahovat minimálně informace o jeho poloze (GNSS). Ostatní data ze senzorů (poloha, teplota, tlak, vlhkost, inerciální informace) budou logovány přímo v měřícím systému balónu. Na základě parametrů vysílaného / přijímaného signálu a informací z telemetrii vytvořte model šíření pro daný typ spoje (případně i jiné možnosti propojení) během jeho vzestupné trasy. Za předpokladu možnosti vypuštění meteorologického balónu vše experimentálně ověřte a porovnejte model šíření zahrnující měřený profil atmosférických parametrů s reálnými daty.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PECHAČ, Pavel, ZVÁNOVEC, Stanislav. Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [2] ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner, sv. 2. ISBN 978-80-200-1505-1.
- [3] McNamara, Marilyn C. An Analysis of Burst Altitude for Weather Balloons. Antonian Scholars Honors Program, 2016, [online], citováno 27.1.2022, dostupné z: https://sophia.stkate.edu/shas_honors/43.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta