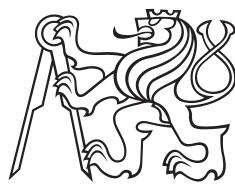


Bakalářská práce



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.
Květen 2022

Poděkování

Děkuji vedoucímu Tomášovi Kořínkovi za cenné rady a pomoc při realizaci práce.
Děkuji Ing. Martinu Motlovi za pomoc s vypouštěním sondy. (tmobile tracker)

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

Abstrakt

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 stěžejních hardwarových komponent, návrh designu desek plošných spojů a stejně tak mechanickou zástavbu elektroniky. Teoretický model je následně porovnáván s reálnými daty přeneseného výkonu a jsou vyvozovány závěry. 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.

V kapitole zaměřené na samotný experiment popisuje průběh experimentu a přípravu naměřených dat na další zpracování. Data jsou následně použita při tvorbě teoretického modelu šíření. Tento model je porovnán s hodnotami vycházejících z reálného měření daného radiového přenosu pomocí spektrálního analyzátoru.

Klíčová slova: slovo, klíč

Vedoucí: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
Technická 2,
Praha 6

Abstract

Abstract

Keywords: word, key

Title translation: Telemetric Data Transmission from Meteorological Balloon

Obsah	
1 Úvod	1
1.1 Cíl práce	1
1.2 Způsob řešení	1
2 Návrh a požadavky	3
2.1 Šíření vln ve troposféře	3
2.1.1 Troposférická refrakce	3
2.1.2 Rádiový spoj	4
2.2 Požadavky	5
2.3 Elektronika sondy	6
2.3.1 Sledování sondy.....	7
2.4 Firmware sondy	9
2.5 Mechanická zástavba	9
2.6 Pozemní stanice	10
2.7 Software pro zobrazení telemetrických údajů	10
3 Realizace	11
3.1 Elektronika	11
3.1.1 Použité komponenty.....	11
3.1.2 PCB pro připojení modulů ..	13
3.1.3 Napájení	13
3.2 Mechanická zástavba	15
3.3 Firmware	17
3.3.1 Obsluha senzorů	17
3.3.2 Rozberání GPS dat	19
3.3.3 Zjištění náklonu sondy	21
3.4 Pozemní stanice	24
3.5 Software pro zobrazení telemetrických údajů	26
3.6 Testování a měření	27
4 Experiment	31
4.1 Průběh experimentu	31
4.2 Naměřená data	33
5 Výsledky	35
5.1 Výstup z experimentu	35

6 Závěr	39
6.1 Shrnutí experimentu	39
6.2 Možná vylepšení	39
A Literatura	41
B Zadání práce	43

Obrázky

3.1 Redukční desky pro moduly	14	3.13 Profil trasy mezi Prahou a horou Říp, vykresleno pomocí http://www.heywhatsthat.com/	30
3.2 Schéma spínaného zdroje umístěného na spodní redukční desce	15	4.1 Pozemní segment	32
3.3 Schéma lineárních regulátorů umístěných na horní redukční desce	15	5.1 Výškový profil refraktivity	36
3.4 Příklad ošetření vstupů TVS diodami	16	5.2 Proložené hodnoty refraktivity exponenciální křivkou	37
3.6 Vývojový diagram pro kompenzaci měřených hodnot senzorem MS5607, převzato z https://www.parallax.com/package/altimeter-module-ms5607-datasheet /	18	5.3 Průběh výkonu přijatého spektrometrem, výšky sondy a vlhkosti okolí v čase	38
3.7 Zrychlení působící na sondu	22		
3.8 Měření náklonu sondy pomocí vektoru magnetické indukce	23		
3.9 Rotace sondy kolem osy tvořené vektorem magnetické indukce (pohled zespod)	24		
3.10 Trajektorie letu zobrazena pomocí python skriptu 3.11	28		
3.11 Sonda umístěna v klimakomoře	29		
3.12 Směrové charakteristiky antény pro různá natočení kolem její osy . .	30		

Tabulky

3.1 Módy GPS přijímačů u-blox	12
3.2 Rozsah senzoru MS5607, převzato z https://www.parallax.com/package/ altimeter-module-ms5607-datasheet)	13
3.3 Formát \$GPGLL zprávy	19
3.4 Formát telemetrické zprávy	21
3.5 Formát dat ukládaných na SD kartu	22
3.6 Formát GPGGA zprávy	25
3.6 Formát GPGGA zprávy	26
4.1 Surová data času a výkonu změřeného spektrálním analyzátorem	34

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. Teoretické modely jsou posléze porovnány s reálnými daty popisující rádiový spoj.

1.2 Způsob řešení

Pro měření podmínek ve troposféře bude zkonztruována 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. Přijímací anténa bude umístěna na střeše budovy FEL v Dejvicích a bude upevněna na anténní sledovač. Ten na základě přijatých GPS souřadnic dokáže nasměrovat anténu na sondu, čímž bude zajištěn stejný zisk přijímací antény po celou dobu letu. Díky potřebným senzorům umístěným na sodě bude možné získat náklon sondy a tedy i upravit zisk antény pro daný vyzařovací úhel.

1. Úvod

V jakém čase psát úvod?

Kapitola 2

Návrh a požadavky

Tato kapitola popisuje návrh experimentu, díky kterému bude možné vytvořit matematický model přenosu radiového signálu a jeho následné ověření se změřenými daty. V první části kapitola popisuje teorii využívanou při modelování a měření parametrů přenosu.

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.

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]. Pdle [4] lze tlak vodních par vypočítat také podle relativní vlhkosti vzduchu H jako

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

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

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 šroubovitě antény s levotočivou polarizcí.

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, L_{kabel} ztráty kabelu a $L_{splitter}$ ztráty rozdvojký, rozdělující signál mezi spektrální analyzátor a přijímač radiového signálu.

Ztráty volným byly spočteny podle [1] jako

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

Jelikož jsou ztráty volným prostorem závislé na vzdálenosti, lze je vyjádřit pouze jako intervalem krajních hodnot. Místo vypuštění sondy, Praha - Libuš, je od buovy 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.

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

Výsledný výkon očekávaný na vstupu spektrálního analyzátoru tedy bude po dosazení do (2.4):

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

Hodnoty výkonu lze očekávat v rozmezí od $P_{P_{\max}} = -48$ dBm do $P_{P_{\min}} = -61$ dBm.

■ 2.2 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 mikročipy 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 sjednané ČHMÚ. Toto povolení se vztahuje na vypouštění volných balónů s užitečným zatížením do celkové hmotnosti 600 g. Denní sonda Vaisala RS41, kterou ČHMÚ posílá 3× denně, váží 84 g. Sonda vyvíjená v rámci této práce tedy musí splňovat požadavek na hmotnost do 516 g.

Značná část GPS přijímačů je od výrobce zablokována pro použití ve výškách větších jak 10 km n. m. a je nutné zvolit přijímač, jehož maximální pracovní výška je alespoň 40 km.

■ 2.3 Elektronika sondy

V samotném návrhu elektroniky sondy bylo možné zvolit jednu ze dvou cest. Níže práce popisuje výhody, nevýhody a potenciální rizika každé z nich. Dále zdůvodňuje cestu, která byla zvolena při řešení této práce.

■ Využití vývojových modulů

V dnešní době existuje veliké množství mikročipů a MEMS čipů, které lze zakoupit ve formě modulů. Jedná se zpravidla o malé deky plošných spojů osazených konkrétními čipy 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 na okraji PCB.

V případě mikroprocesoru se jedná o vývojový kit Nucleo od firmy *ST Microelectronics*. Jedná se o PCB 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 PCB tohoto kitu ovlivňuje celkovou velikost elektroniky sondy.

■ Samostatné senzory

Druhá cesta, kterou je možná se vydat při vývoji elektroniky v sondě je samostatná deska, která obsahuje jednotlivé mikročipy bez jejich modulů a separátních PCB. 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 ale časově náročné a v případě způsobené chyby se špatně ladí. 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.

2.3.1 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 využívají, nicméně velmi nedoporučovanou <https://www.highaltitudescience.com/pages/tracking-a-weather-balloon> metodu je zasílání dat skrze mobilní síť. GSM síť, přes které se data posílají, jsou aktivní přibližně do výšky 10 km (odkaz), není tudíž možné sledovat sondu po celou dobu letu. 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 <https://www.highaltitudescience.com/pages/tracking-a-weather-balloon>. Data se poté budou pošlu dál, nebo se nahrají na internetovou stránku k tomuto účelu zřízenou (aprs.fi), odkud je může každý sledovat. 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

2. Návrh a požadavky

dopadu, můžeme přesto APRS vysílač najít pomocí radiového přijímače, nalaďeného na vysílací frekvenci, a směrové antény. Další nevýhoda je potřebná licence pro vysílání na frekvenci 144,8 MHz, na které probíhá APRS <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-156#cast1>

■ Satelitní sledovač

Další způsob je využití satelitního sledovače. Jedná se zpravidla o zařízení na sledování majetku v případě odcitání. Získaná data o poloze se posílají přes síť satelitů na nízké oběžné dráze Země. Využívána je služba *Globalstar*, jež se specializuje na provoz satelitních 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. https://www.findmespot.com/downloads/SPOT_TRACE_User_Guide.pdf. 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.

■ 2.4 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.

■ 2.5 Mechanická zástavba

Mechanická zástavba celé sondy musí splňovat požadavky pracovníků ČHMIÚ, 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 vyvýjené sondy.

2.6 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. Firmware musí být odolný vůči náhodným chybám způsobených přenosem na velkou vzdálenost. Příjem i posílání dat probíhá přes sériovou linku.

Elektronika pozemní stanice není vystavena extrémním podmínkám a není nutné řešit její odolnost vůči vnějším vlivům.

2.7 Software pro zobrazení telemetrických údajů

Software určený pro příjem dat na počítači umístěném v automobilu jdoucí ve směru dopadu sondy. Software musí určit validní data a vyznačit GPS pozici sondy na mapě. Další funkcí 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 3

Realizace

Tato kapitola se zabývá samotnou realizací sondy. Popisuje cestu, kterou byla práce směřována při vývoji elektroniky a popisuje výběr jednotlivých komponent. Dále vysvětluje dílčí části firmwaru sondy a způsob, jakým byly řešeny problémy. Popisuje jak vysílací část - sondu, tak přijímací části. Jednak pozemní stanici, která formátovala data do zprávy čitelné anténním trackerem a jednak přijímací software na zobrazení pozice na mapě.

3.1 Elektronika

3.1.1 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 mnoha 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).

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 3.1: Módy GPS přijímačů u-blox

■ GPS modul

GPS moduly jsou zpravidla omezeny dvěma parametry. Maximální nadmořsou výškou 18 km a maximální rychlostí 515 m/s vůči zemi <https://www.ecfr.gov/current/title-22/part-121>. 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 (https://www.u-blox.com/sites/default/files/SAM-M8Q_DataSheet_%28UBX-16012619%29.pdf) 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 3.1. 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 (<https://www.sensorsone.com/altitude-pressure-units-conversion/>) 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 3.2. Teplotní a tlakový senzor je součástí modulu od firmy *Parallax*. Výrobce na stránkách produktu <https://www.parallax.com/product/altimeter-module-ms5607/> 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 3.2: Rozsah senzoru MS5607, převzato z <https://www.parallax.com/package/altimeter-module-ms5607-datasheet>)

■ 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 (<https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3721/AM2320.pdf>).

■ Senzor orientace

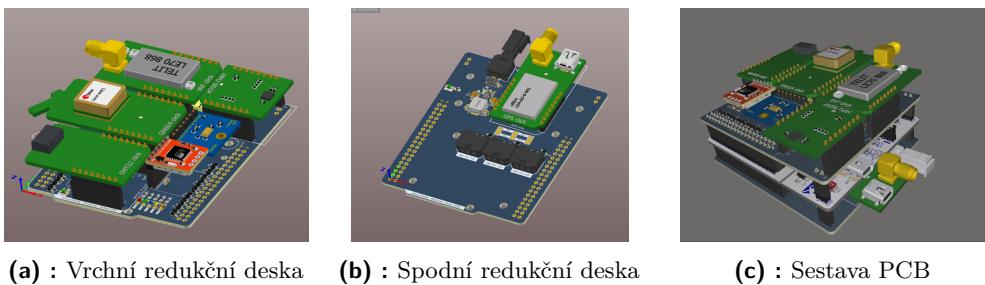
Pro zjištění orientace bylo použito senzoru MPU9250, který je součástí modulu 9DOF Click. Jedná se o gyroskop Senzor resp. modul byl vybrán, jelikož byl již dříve používán na jiných projektech a byl ihned dostupný. Díky tomu bylo ihned možné přejít ke psaní ovladače pro vyčítání dat a jeho implementaci do systému. Senzor také splňuje rozsah pracovních teplot a lze tedy využít v podmínkách, které při letu nastanou (<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>).

■ 3.1.2 PCB 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 PCB na propojení Nucleo kitu a modulů. Moduly jsou vyobrazeny na obr. 3.1a a 3.1b.

■ 3.1.3 Napájení

Jako zdroj energie po dobu letu byly vybrány tužkové baterie *Energizer ultimate lithium*. Dle technického listu (<https://data.energizer.com/pdfs/191.pdf>) jsou schopny ope-

**Obrázek 3.1:** Redukční desky pro moduly

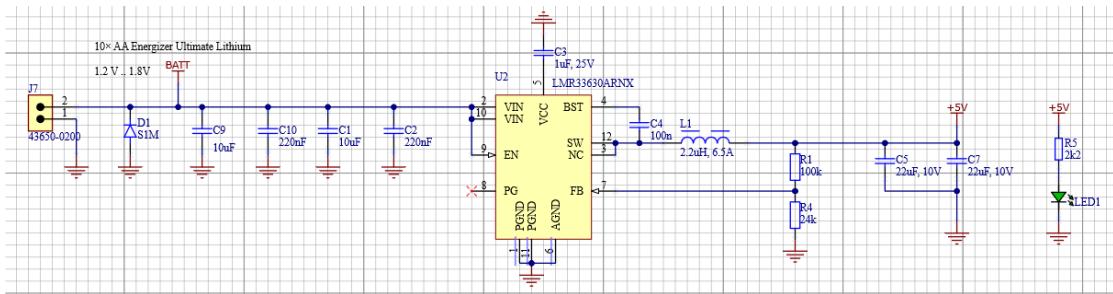
rovat až do teploty -40 °C při poklesu kapacity z xxx na xxx mAh. S ohledem na teploty panující ve stratopauze, které klesají až k -60 °C, byl počet zvýšen na 10 ks, nechávající kapacitní rezervu.

Zdroje

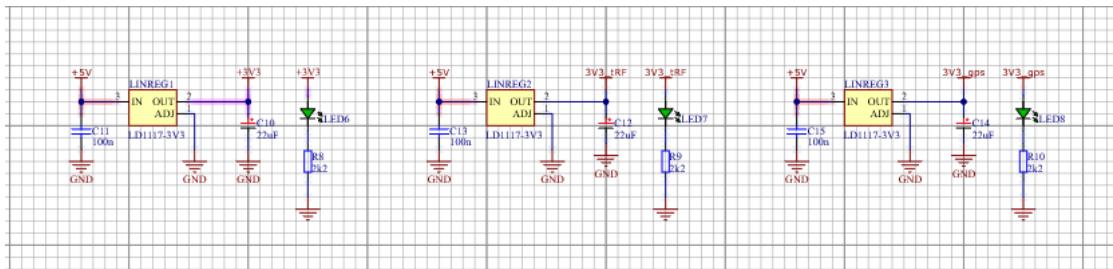
Vstupní napětí se v závislosti na teplotě a momentálním odběru pohybuje od 18 V do 10 V. Pro zvýšení účinnosti byl jako hlavní regulátor využit spínaný zdroj. S ohledem na dostupnost součástek a ověřenost funkčnosti byl vybrán spínaný zdroj *LMR33630* od firmy *Texas Instruments*. Účinnost tohoto zdroje se pohybuje od TODO: zjistit z DSH.

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. TODO: kolik pro 5V vout.

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.



Obrázek 3.2: Schéma spínaného zdroje umístěného na spodní redukční desce



Obrázek 3.3: Schéma lineárních regulátorů umístěných na horní redukční desce

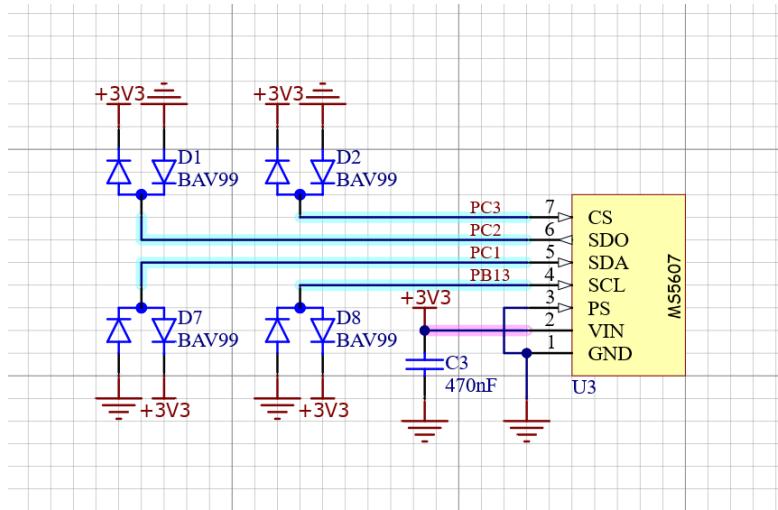
Ochrana pinů

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. 3.4.

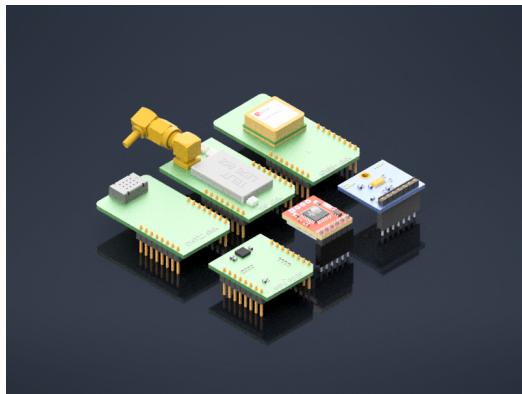
3.2 Mechanická zástavba

Součástí práce je i mechanická zástavba krytů pro elektroniku. Pro přehlednost a optimální model krytu bylo potřeba vymodelovat i jednotlivé moduly. Kolem přesného 3D modelu elektroniky mohl být vymodelován kryt bez nutnosti čekat na výrobu redukčních desek.

Díky jednotlivým modelům bylo možné vytvořit kompletní model elektronické části, kolem kterého byl poté vymodelován kryt (obr. 3.5b). Kryt byl modelován s ohledem na anténu umístěnou ve spodní části. Stěny kolem antény jsou ztenčené, aby co nejméně ovlivnily ladění antény na 868 MHz. Malá mechanická odolnost stěn je kompenzována čtyřmi výztužemi vedoucí po obvodu stěny.



Obrázek 3.4: Příklad ošetření vstupů TVS diodami



(a) : Vymodelované moduly



(b) : Řez vrchní části krytu 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.

TODO: názorný jednoduchý model s dírou a bez, iterace

Připojení sondy ČHMÚ bylo provedeno pomocí gumového pásu, 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.

TODO: obrázek připojení sondy

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

model PCB, model sondy, iterace, odlehčování, připojení sondy čhmú, bezpečnostní závěsy

3.3 Firmware

3.3.1 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);
```

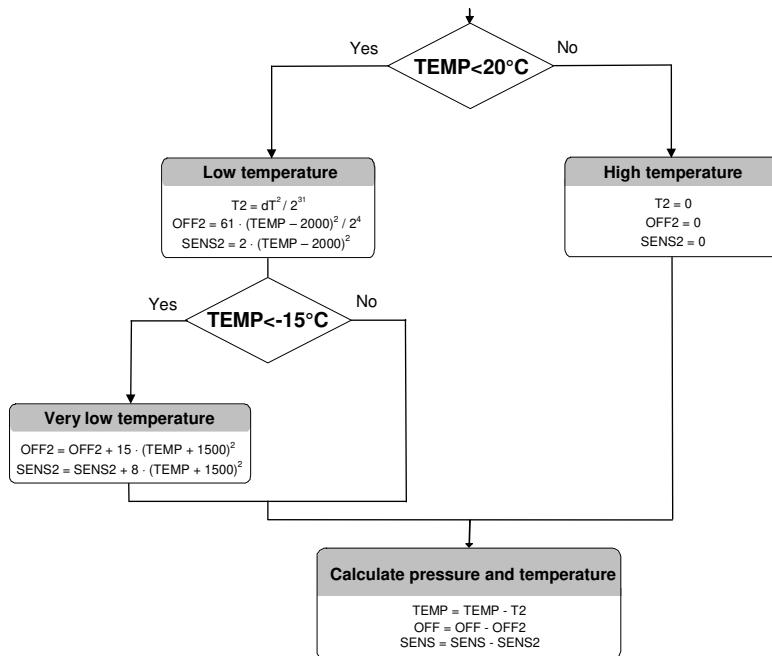
Senzor následně vyšle data obsahující informace o vlhkosti a teplotě. Jejich příjem zajišťuje funkce

```
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.



Obrázek 3.6: Vývojový diagram pro kompenzaci měřených hodnot senzorem MS5607, převzato z <https://www.parallax.com/package/altimeter-module-ms5607-datasheet/>

```

1 SPITransmitData = CONVERT_D1_COMMAND | Pressure_0SR;
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. 3.6.

Na rozdíl od předešlých senzorů, tento senzor měří hodnoty a ukládá je do příslušných registrů průběžně. Registry senzoru jsou popsány v dokumentu <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/RM-MPU-9250A-00-v1.6.pdf>. 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 adrese 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 níže. Hodnoty ReadAddr a READWRITE_CMD jsou definovány v <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/RM-MPU-9250A-00-v1.6.pdf>.

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

3.3.2 Rozberání GPS dat

Data jsou GPS přijímačem posílána každou sekundu přes sériovou linku ve formátu NMEA zpráv (<https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual-Rev2.1-Dec07.pdf>). Jedná se o standardizovaný formát GPS dat specifikovaný organizací NMEA (National Marine Electronics Association). Příklad NMEA zpráv je zanesen níže.

```
1 $GPRMC,132456.00,A,5005.77089,N,01421.46534,E,1.157,,290122,,,A*78
2 $GPVTG,,T,,M,1.157,N,2.144,K,A*22
3 $GPGGA,132456.00,5005.77089,N,01421.46534,E,1,05,1.79,294.0,M,44.4,M,,*5D
4 $GPGSA,A,3,17,06,24,02,15,,,,,,2.46,1.79,1.70*0B
5 $GPGSV,4,1,13,02,11,134,21,06,20,090,23,10,02,270,,11,06,128,19*76
6 $GPGSV,4,2,13,12,70,261,,15,10,185,15,17,17,041,13,19,37,054,*7B
7 $GPGSV,4,3,13,22,10,325,,24,72,147,23,25,31,257,08,28,08,068,21*7B
8 $GPGSV,4,4,13,32,25,313,*4C
9 $GPGLL,5005.77089,N,01421.46534,E,132456.00,A,A*69
```

Příklad formátu \$GPGLL zprávy je v tabulce . Informace obsažené v této zprávě jsou vysvětleny v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: 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

3. Realizace

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 3.1.

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

Ukázka kódu 3.1: 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 {
3     DataRecieved = Size;
4 }
```

Ukázka kódu 3.2: 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 3.3. 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 správné rozdělení přijatých dat je informace o počtu \$GPGSV zpráv nutná, jelikož ovlivňuje pořadí dalších zpráv.

Funkce `mainParse` v ukázce 3.3 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-tém řádku
3     uint16_t iter = 0;//iterační proměnná
4     uint8_t n = 0;//n-ty řádek
5
6     while(iter < DataRecieved){
7         if(!(buffer[iter] == '\n') || (buffer[iter] == '\r')){//dokud
8             nenastane konec řádku
9             parse[n*linelen + k[n]] = buffer[iter];
10            if((k[n] == 7) && (parse[n*linelen + 5] == 'V')){//hledání GSV
11                zprávy, 7. znak je počet satelitu
12                *nsat = parse[n*linelen + k[n]] - '0';
13            }
14            k[n]++;
15            parse[n*linelen + k[n]] = '\n';//enter na konec řádku
16        }
17    }
18}
```

```

16     n++; //novy radek
17 }
18 iter++; //posun v RAW zprave - GPSbuffer
19 }
20 }
```

Ukázka kódu 3.3: Hlavní parsovací funkce

Příklad volání funkce v hlavní smyčce programu je znázorněn v ukázce kódu 3.4.

```

1 uint8_t GPSparse[15][200] = {}; //NMEA rozdelená podle radku
2 uint8_t nsat = 0; //počet GSV zprav
3
4 uint8_t GLLposition[8] = {}; //délka daného 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 ostatní NMEA zpravy, GGA, RMC...
```

Ukázka kódu 3.4: 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, sešijí 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 3.4 a 3.5.

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 3.4: Formát telemetrické zprávy

3.3.3 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.

3. Realizace

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 3.5: Formát dat ukládaných na SD kartu

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

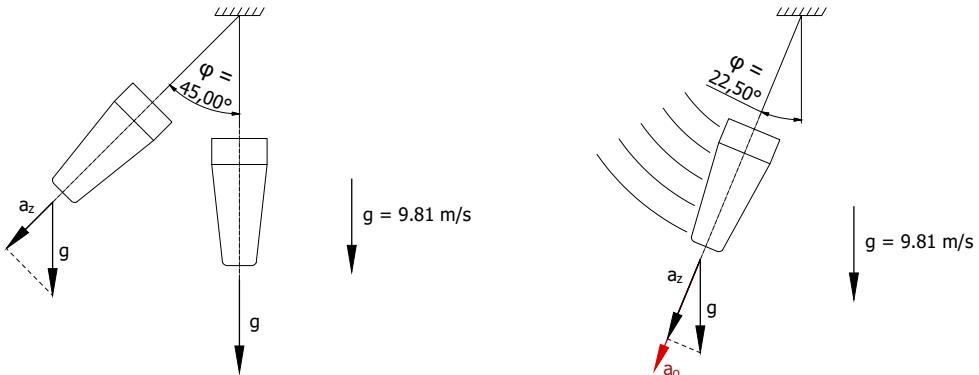
$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{a_z}{g} \right). \quad (3.1)$$

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

$$a_o = \omega^2 l, \quad (3.2)$$

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 statickém 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.



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

Obrázek 3.7: 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

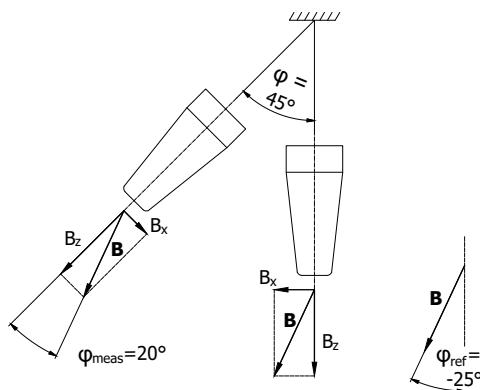
a do bufferu je ukládána nejnižší hodnota zrychlení ve směru osy z viz ukázka kódu 3.5. Funkce `filter(int *out, int *in, int *b)` je dolní propust prního řádu. Po uměhnutí sekundové periody se minimální hodnota vyčte z bufferu, uloží spolu s dalšími daty na SD kartu a buffer se vynuluje.

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

Ukázka kódu 3.5: 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. 3.8. Na začátku měření je potřeba změřit úhel, kterým vektor magnetické indukce směruje. Následně pro náklon sondy platí

$$\varphi = \varphi_{\text{meas}} - \varphi_{\text{ref}}. \quad (3.3)$$

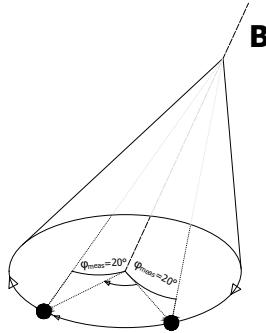


Obrázek 3.8: Měření náklonu sondy pomocí vektoru magnetické indukce

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. 3.9. Tento způsob by šlo použít poze v případě, že by vektor magnetické indukce směřoval svisle k zemi. Při obecné orientaci bohužel tato metoda využít nejde.

TODO:

1. Řešení v flightcontrollerech na dronech - kalman, příliš složité na implementaci, komplementární filtr



Obrázek 3.9: Rotace sondy kolem osy tvořené vektorem magnetické indukce (pohled zespod)

2. Moje řešení

■ 3.4 Pozemní stanice

výstřizky kódu z driverů, sample GPS dat, vyčítání z teplota/tlak, tlak/vlhkost, gyro/acc/mag, parsovací funkce, změřené minimum accelerace v z-ose, sešití dat, watchdog, reset při erroru

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.6, 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 3.7. 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 3.6, a jako konec zprávy brát až znak "\n".

```

1 uint8_t buff = 0;           //buffer pro aktuálně přijaty znak
2 uint8_t rx[1000] = {};     //buffer pro aktuálně přijímanou zprávu
3
4 while(buff != '\n'){ //dokud nepřijde konec zprávy
5     HAL_UART_Receive(&huart1, &buff, 1, 4000);
6     rx[len] = buff; //uložení znaku do aktuálně přijímaného bufferu
7     len++;
8 }
```

Ukázka kódu 3.6: Příjem dat pozemní stanici

```

1 uint8_t frameLen[10] = {};//pozice v aktuálním poli
2 uint8_t frame[10][13] = {};//buffer pro data rozdělena do
   jednotlivých polí
```

```

3
4 for(int i = 0; i< len; i++){
5     if(rx[i] != ';'){ //pokud znak není oddělovací
6         frame[n][framelen[n]] = rx[i]; //do bufferu se uloží aktuální
7         znak
8         framelen[n]++;
9     }
10    else{
11        n++; //presun na další pole
12        framelen[n] = 0; //vynulování pozice v tomto poli
13    }
}

```

Ukázka kódu 3.7: 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 3.6. 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 3.8.

```

1
2 uint16_t xor = 0;
3 for ( uint8_t i = 1 ; i < cpypos ; i ++ ) {
4     xor = xor ^ tx[i]; //XOR mezi aktuálním znakem a předešlým výsledkem
5 }
6
7 uint8_t checksum[2] = {};
8 itoa(xor, checksum, 16); //prevod kontrolního spoustu do hexadecimálního
9 textového formátu
10 if((checksum[0]>96) && (checksum[0]<123)) checksum[0] ^=0x20; //zmena z
    malych pismen na velka
11 if((checksum[1]>96) && (checksum[1]<123)) checksum[1] ^=0x20;

```

Ukázka kódu 3.8: Výpočet kontrolního součtu

TODO - ukázat na osciloskopu/log analyzátoru balíky dat

Tabulka 3.6: 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		

Tabulka 3.6: Formát GPGGA zprávy

Název	Příklad	Jednotky	Popis
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

3.5 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 obr. ???. K modulu byl připojen převodník ze sériové linky na USB, který byl dostatečně dlouhým USB kabelem připojen k laptopu spolujezdce.

TODO:render platformy

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 přijímána do bufferu a následně rozdělena podle délících znaků viz kód 3.9.

```

1 def getData(self):
2     try:
3         new_data = self.handler.readline().decode(encoding="UTF-8")
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 3.9: Blok kódu pro příjem a rozdělení 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 – DDDMM.MMMMMM DDDMM.MMMMMM viz tabulka 3.3. Pro zobrazení souřadnic pomocí *gmplot* je nutné souřadnice převést do formátu desetinných stupňů DD.MMMMMM DDD.MMMMMM. 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.MMMMMM se vydělí 60. Výsledek se dosadí za desetinnou tečku. Algoritmus pro převod v jazyce Python je znázorněn v kódu 3.10.

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

Ukázka kódu 3.10: Převod formátu GPS souřadnic

Zobrazení souřadnic na mapě je provedeno pomocí modulu *gmplot* (<https://github.com/gmplot/gmplot>). Ukázka kódu 3.11 ukazuje způsob inicializace modulu a zobrazení souřadnic sondy na mapě. Vzniklý soubor `my_map.html` lze otevřít v běžném prohlížeči. Vizualizace přijatých GPS souřadnic je na obr. 3.10.

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

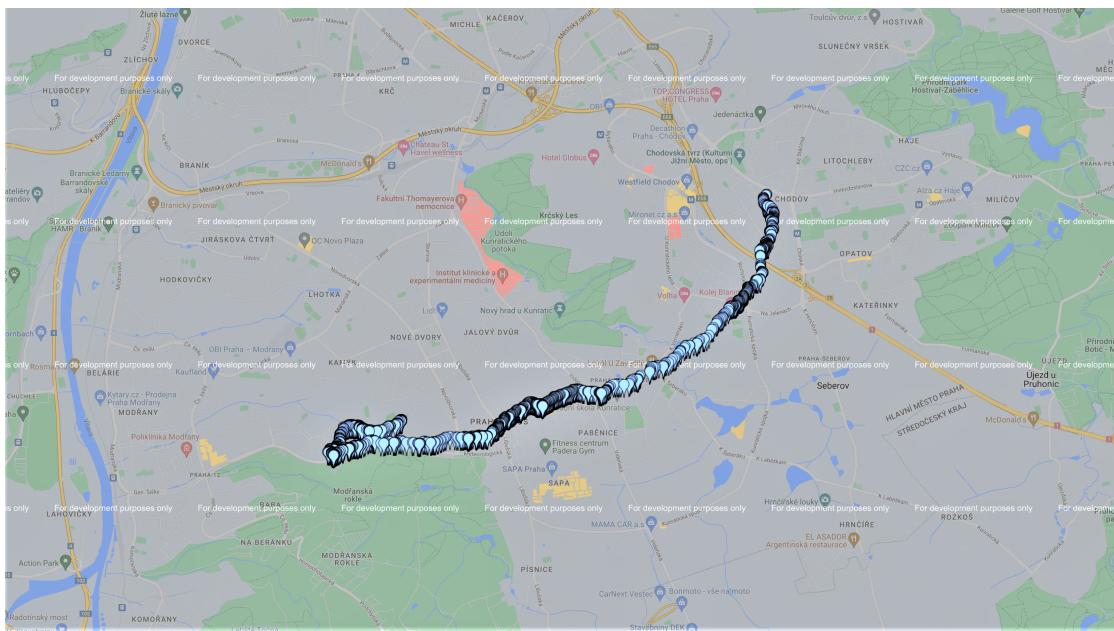
Ukázka kódu 3.11: Příklad zobrazení GPS souřadnic

3.6 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 uvlivňuje.

Ověření funkčnosti sondy při nízkých teplotách bylo provedeno v klimakomoře na katedře technologie. Díky rázovému schlazení lze do jisté míry simulovat časový průběh teploty okolí, ve kterém se sonda pohybuje. Sonda byla umístěna do klimakomory 3.11 za pokojové teploty a schlazena na -55 °C. Při této teplotě byla následně ponechána xx minut a byla sledována funkčnost elektroniky. Průběh teploty okolí měřený dvěma senzory umístěnými

3. Realizace



Obrázek 3.10: Trajektorie letu zobrazena pomocí python skriptu 3.11

v sondě je vidět v grafu... . Z grafu je vidět rozdílná tepelná kapacita použitých senzorů teploty.

Měření směrové charakteristiky proběhlo na katedře elektromagnetického pole v bezodrazné komoře. Sonda připevněna na pohyblivou osu byla otáčena motorem a 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. 3.12.

TODO - spočítat zisk antény Zisk antény byl počítán relativně podle zisku známé antény. Použitá anténa byla xxx se ziskem xxx, jak je uvedeno v dokumentaci (odkaz na dsh).

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. V případně antény umístěné v sondě je přenos znárodněn na obr. xxx.

TODO - graf polarizace

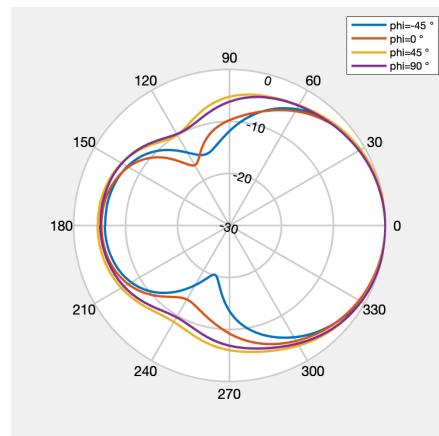
TODO - spočítat koeficient polarizace

Pro ověření dosahu radiového spoje byl přenos dat nejdříve vyzkoušen na zemi. Vysílací část spoje se nacházela na střeše panelového domu na Petřinách. Příjem probíhal na hoře

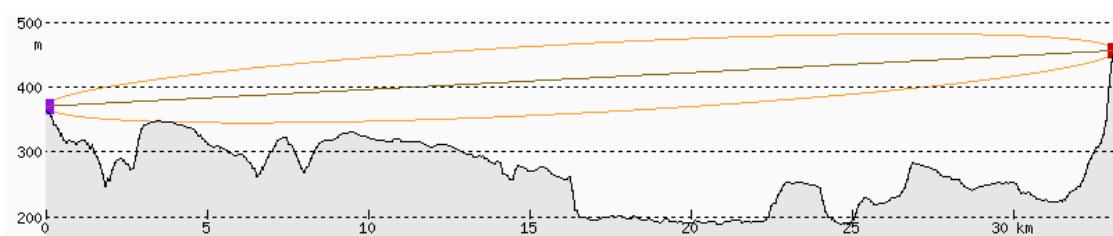


Obrázek 3.11: Sonda umístěna v klimakomoře

Říp. Radiový spoj byl realizován na přímou viditelnost a nebyla zakryta 1. Fresnelova zóna, jak je vidět profilu Zemského povrchu na obr. 3.13.



Obrázek 3.12: Směrové charakteristiky antény pro různá natočení kolem její osy



Obrázek 3.13: Profil trasy mezi Prahou a horou Říp, vykresleno pomocí <http://www.heywhatsthat.com/>

Kapitola 4

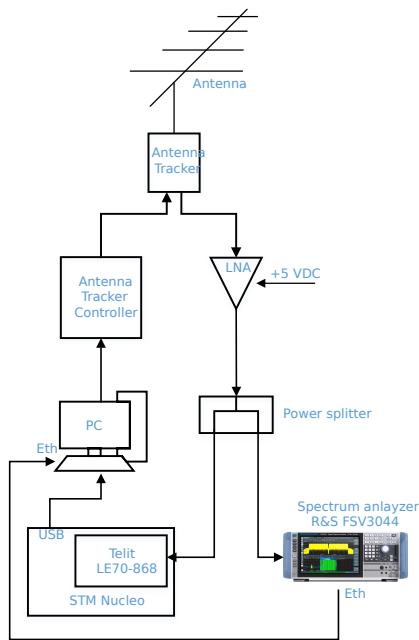
Experiment

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 v Dejvicích na anténním sledovači (obr. 4.1b), 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 zaneseno na obr. 4.1a.

4.1 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 podledních 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 zveřejňována na internetu. Po určení pozice sondy ČHMÚ byla nalezena i má sonda a to



(a) : Schéma pozemního segmentu



(b) : Anténní sledovač

Obrázek 4.1: Pozemní segment

o 50 m jihozápadně. Toto bylo dáno 50m provázkem mezi sondami a směrem větru.

Sonda byla nalezena na stromě ve výšce přibližně 20 m 4.2a. Po neúspěšných pokusech vrhání matky s přivázaným rybářským vlascem byl pro účel sundání postaven dron, na který byl přivázán provázeck. Na přední straně dronu byl hliníkový hák, který se zahákl za závěs sondy a posléze byla sestava provázkem strhnuta ze stromu. Volný pád z výšky 20 m měl bohužel za následek prasknutí spodní části sondy. Nicméně anténa, která byla touto částí chtáněna, zůstala nepoškozena.



(a) : Sonda visící na stromě



(b) : Sonda a dron použity k jejímu sundání

4.2 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 řádky, které je obsahovaly, odstranit. Odstanění poškozených řádků proběhlo následujícím *UNIX*ovým příkazem provedeným v terminálu, který vybere všechny řádky, 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.

```
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;5000.41136;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;
```

Data ze spektrálního 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 vypuštění v epoch formátu je 1651662920.0000. Tento formát byl převeden po načtení souboru v programu Matlab příkazem

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

4. Experiment

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

Tabulka 4.1: Surová data času a výkonu změřeného spektrálním analyzátorem

Kapitola 5

Výsledky

Tato kapitola se zabývá zpracováním 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.

5.1 Výstup z experimentu

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

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right), \quad (5.1)$$

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

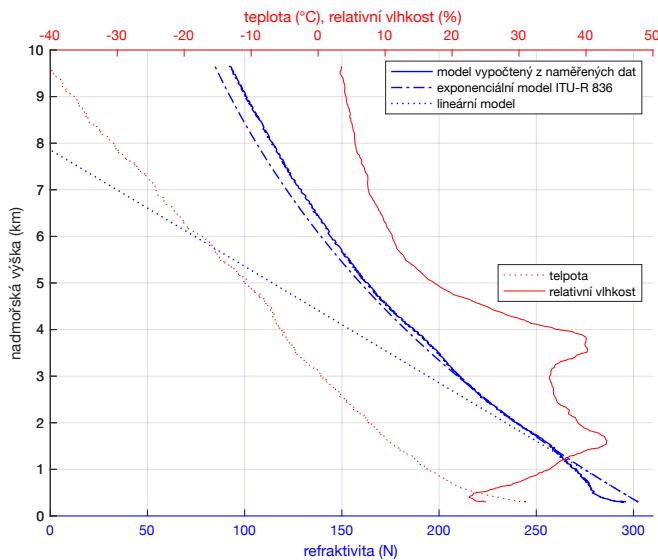
$$e = \frac{H}{100} 6,1121 e^{\frac{17,502t}{240,97+t}}, \quad (5.2)$$

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

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

$$N = N_0 e^{-h/h_0}, \quad (5.3)$$

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].



Obrázek 5.1: Výškový profil refraktivity

Data refraktivity vypočtené pomocí (5.1) byla proložena exponenciální funkcí viz obr. 5.2. 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

$$N(h) = 304,7 e^{-0,000123 h}. \quad (5.4)$$

Z naměřených dat vychází hodnota refraktivity v 0 km jako $N_0 = 304,7$ N. Porovnáním exponentů z (5.3) a (5.4) dostaneme

$$-h/h_0 = -0,000123 \ h$$

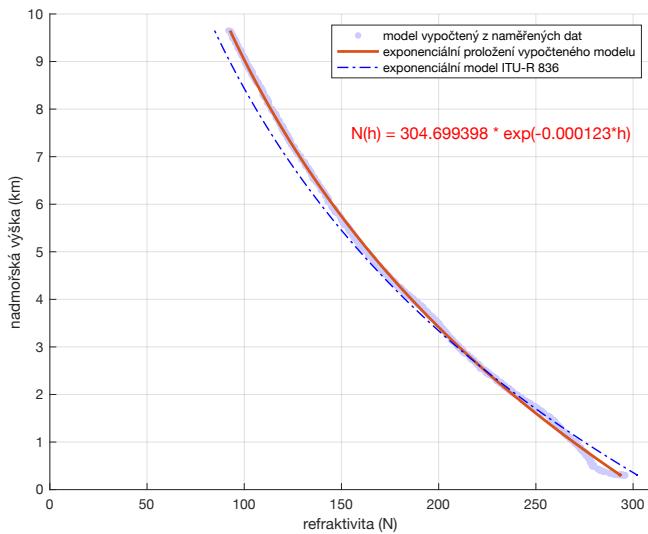
$$h_0 = 1/0,000123 \text{ (m)} \quad (5.5)$$

$$h_0 = 8130,1 \text{ m.}$$

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

TODA PROJEKT PRO PŘEVÝHODNÉ DVA KILOMETRY

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



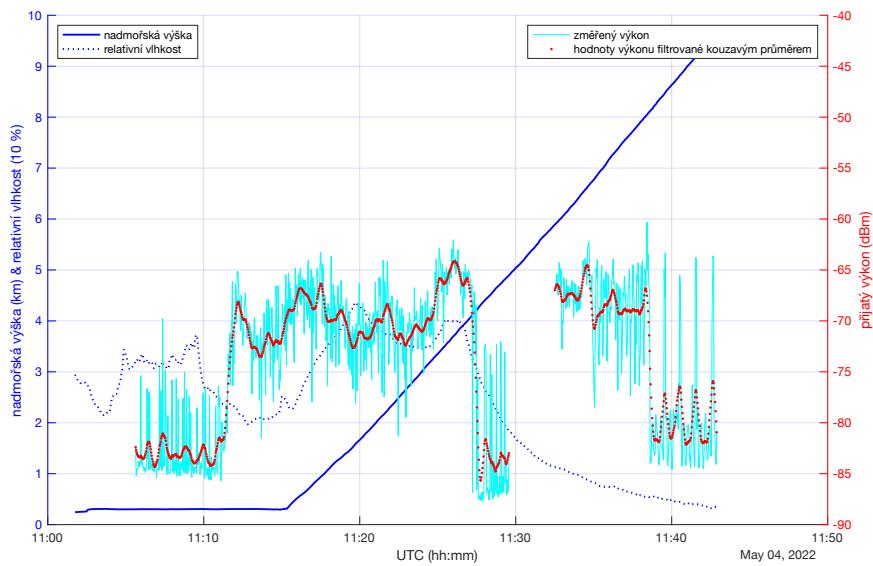
Obrázek 5.2: Proložené hodnoty refraktivity exponenciální křivkou

přijímací anténa se začala nepředvídatelně natáčet. Toto je vidět na obr. 5.3, kdy zcela bez jakýhkoliv 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.

TODO:POLOMĚR OHYBU V ZÁVISLOSTI NA REFRAKTIVITĚ poloměr na str. 79
TODO:do grafu hodit závislost FLS na vzdálenosti (má to vůbec smysl?)

5. Výsledky



Obrázek 5.3: Průběh výkonu přijatého spektrometrem, výšky sondy a vlhkosti okolí v čase

Kapitola 6

Závěr

6.1 Shrnutí experimentu

co se povedlo, co se nepovedlo. Vyrobil jsem sondu a sw, přestala vysílat - proč?

6.2 Možná vylepšení

malé pcb bez modulů, optimalizace sw, nepoužívat HAL, programovat přes registry, měření náklonu sondy, častější posílání dat, nezávislost na GPS.

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.

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