

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 Tomáši 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

Aaaabstrakt

**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

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	4.1.2 Použité komponenty . . . . .	10
<b>2 Cíl práce</b>	<b>3</b>	4.1.3 Testování elektroniky . . . . .	12
2.1 Šíření vln ve troposféře . . . . .	3	4.1.4 PCB pro připojení modulů . .	12
2.2 Způsob řešení / návrh experimentu	3	4.1.5 Napájení . . . . .	13
2.2.1 Měřená data . . . . .	3	4.2 Mechanická zástavba . . . . .	14
2.3 Součásti experimentu . . . . .	4	4.3 Firmware . . . . .	16
<b>3 Návrh systému</b>	<b>5</b>	4.3.1 Obsluha senzorů . . . . .	16
3.1 Požadavky . . . . .	5	4.3.2 Zjištění náklonu sondy . . . . .	18
3.2 Elektronika sondy . . . . .	6	4.4 Pozemní stanice . . . . .	18
3.2.1 Sledování sondy . . . . .	6	4.5 Software pro zobrazení telemetrických údajů . . . . .	19
3.2.2 Přímé posílání GPS dat . . . . .	7	4.6 Testování a měření . . . . .	19
3.2.3 Zjištění pozice sondy ČHMÚ .	7	<b>5 Experiment</b>	<b>21</b>
3.3 Firmware sondy . . . . .	8	5.1 Průběh experimentu . . . . .	21
<b>4 Realizace</b>	<b>9</b>	5.2 Naměřená data . . . . .	21
4.1 Elektronika . . . . .	9	<b>6 Výsledky</b>	<b>23</b>
4.1.1 Způsob realizace elektroniky . .	9	6.1 Výstup z experimentu . . . . .	23
		6.2 Zpracování dat . . . . .	23

<b>7 Závěr</b>	<b>25</b>
7.1 Shrnutí experimentu .....	25
7.2 Možná vylepšení .....	25
<b>A Literatura</b>	<b>27</b>
<b>B Zadání práce</b>	<b>29</b>

## Obrázky

4.1 Redukční desky pro moduly . . . .	13
4.2 Schéma spínaného zdroje umístěného na spodní redukční desce . . . . .	14
4.3 Schéma lineárních regulátorů umístěných na horní redukční desce	14
4.4 Příklad ošetření vstupů TVS diodami . . . . .	15
4.6 Vývojový diagram pro kompenzaci měřených hodnot senzorem MS5607, převzato z <a href="https://www.parallax.com/package/altimeter-module-ms5607-datasheet/">https: //www.parallax.com/package/ altimeter-module-ms5607-datasheet/</a>	17

## Tabulky

4.1 Módy GPS přijímačů u-blox . . .	11
4.2 Rozsah senzoru MS5607, převzato z <a href="https://www.parallax.com/package/altimeter-module-ms5607-datasheet/">https: //www.parallax.com/package/ altimeter-module-ms5607-datasheet)</a>	12







# Kapitola 1

## Úvod

tato práce ze zabývá... ano zabývá se...



## Kapitola 2

### Cíl práce

#### 2.1 Šíření vln ve troposféře

jak to funguje, na čem to závisí (přečíst literaturu)

#### 2.2 Způsob řešení / návrh experimentu

výroba sondy, vypuštění spolu s čmú, naměření dat z tropo a naměření dat na zemi a kombinace do modelu šíření vlny, anténa na trackeru, zjištění směrové charakteristiky, napočítat výkonovou bilanci -> výkon pro vysílání.

##### 2.2.1 Měřená data

jaká data budou měřena - podle literatury

## ■ 2.3 Součásti experimentu

co je potřeba udělat - hw, firmware, sw, mechaniku, naměření dat, naměření charakteristik antény, zpracování dat.

## Kapitola 3

### Návrh systému

#### 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 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.

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.



0 0 0 1 1 0 0

0 1 0 0 0 1 1

[illegible]

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 odlaďování zapojení a také nedostatek součástek samotných. V tomto případě byly dostupnější senzory ve formě modulů a mikroprocesor ve formě vývojového kitu.

### 3.2.1 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 využívána, nicméně velmi nedoporučovaná <https://www.highaltitude-science.com/pages/tracking-a-weather-balloon> metoda 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.highaltitude-science.com/pages/tracking-a-weather-balloon>. Data se poté buď pošlou dál, nebo se nahrají na internetovou stránku k tomuto účelu zřízenou ([aprs.fi](https://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 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 <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 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 telefonů. Ze satelitů jsou následně data posílána 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](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 překloupí, 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 vyvíjenou sondou. Data vysílaná sondou ČHMÚ jsou přijímána a dekodována 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 prodávána a určena pro profesionální použití. Příjemacích stanic je velké množství a tedy je vysoká pravděpodobnost, že budou data ze sondy zachycena.

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

## ■ 3.3 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 poslané 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.

## ■ 3.4 Pozemní stanice

Firmware pro mikroprocesor v pozemní stanici zodpovídá za správné dekodování 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.



Software určený pro příjem dat na počítači umístěném v automobilu jedoucí 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 4

### 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 část. Jednak pozemní stanici, která formátovala data do zprávy čitelné anténním trackerem a jednak přijímací software na zobrazení pozice na mapě.

### 4.1 Elektronika

#### 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 stejné 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 4.1:** Módy GPS přijímačů u-blox

## ■ GPS modul

GPS moduly jsou zpravidla omezeny dvěma parametry. Maximální nadmořskou 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, někteří výrobci uvažují disjunkci, kdy stačí, aby nastala jedna z podmínek 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](https://www.u-blox.com/sites/default/files/SAM-M8Q_DataSheet_%28UBX-16012619%29.pdf)) je maximální výška 50 km a maximální rychlost 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 charakteru 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 (<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 4.2. 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 4.2:** 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

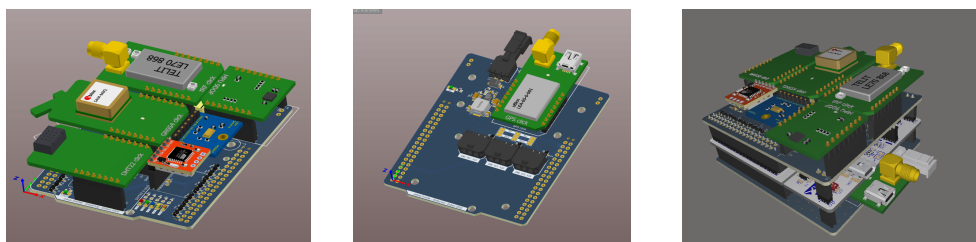
Pro zjištění orientace bylo použito senzoru MPU9250, který je součástí modulu 9DOF Click. Jedná se o gyroskop Senzor resp. modul byl vybrán, jelikož byl již dříve používán na jiných projektech a byl ihned dostupný. Díky tomu bylo ihned možné přejít ke psaní ovladače pro vyčítání dat a jeho implementaci 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>).

### ■ 4.1.2 Testování elektroniky

měření odběru, energie pro posílání dat

### ■ 4.1.3 PCB pro připojení modulů

Ve vývojové fázi práce byly moduly zapojeny skrze nepájivé pole a propojeny propojovacími kabely 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. 4.1a a 4.1b.



(a) : Vrchní redukční deska

(b) : Spodní redukční deska

(c) : Sestava PCB

Obrázek 4.1: Redukční desky pro moduly

#### 4.1.4 Napájení

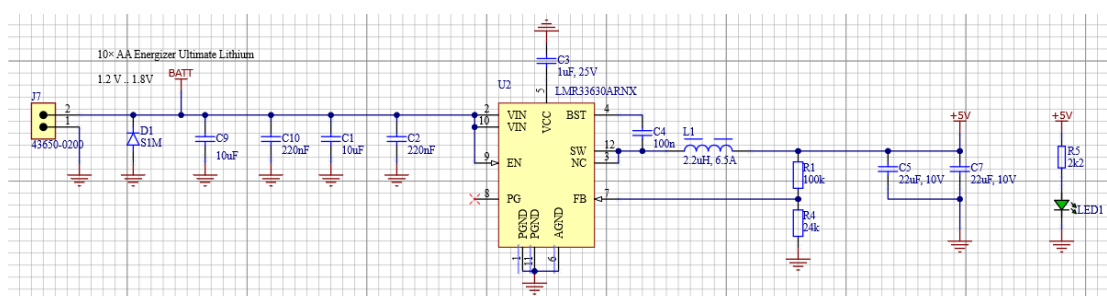
Jako zdroj energie po dobu letu byly vybrány tužkové baterie *Energizer ultimate lithium*. Dle technického listu (<https://data.energizer.com/pdfs/191.pdf>) jsou schopny operovat až do teploty  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  při poklesu kapacity z xxx na xxx mAh. S ohledem na teploty panující ve stratopauze, které klesají až k  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , byl počet zvýšen na 10 ks, nechávající kapacitní rezervu.

#### Zdroje

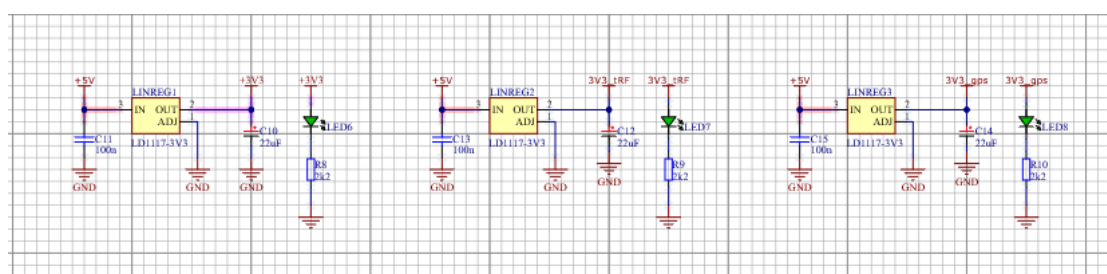
Vstupní napětí se v závislosti na teplotě a momentálním odběru pohybuje od 18 V do 10 V. Pro zvýšení účinnosti byl jako hlavní regulátor využit spínaný zdroj. S ohledem na dostupnost součástek a ověřenost funkčnosti byl vybrán spínaný zdroj *LMR33630* od firmy *Texas Instruments*. Účinnost tohoto zdroje 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 4.2: Schéma spínaného zdroje umístěného na spodní redukční desce



Obrázek 4.3: Schéma lineárních regulátorů umístěných na horní redukční desce

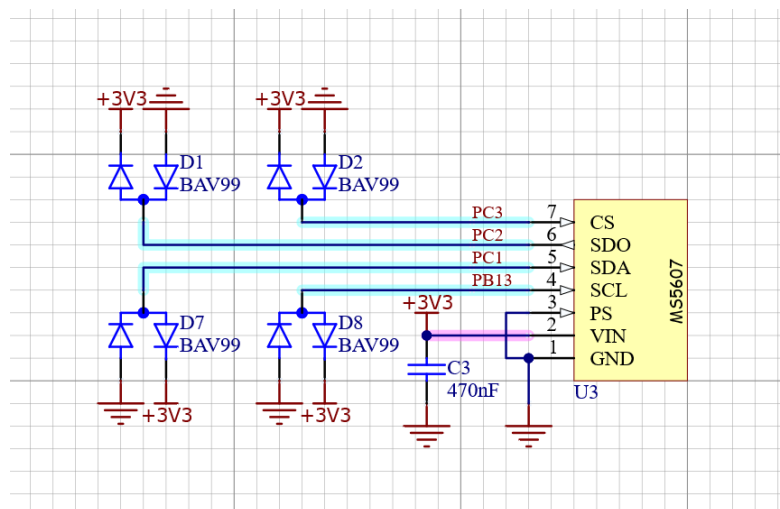
## Ochrana pinů

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. 4.4.

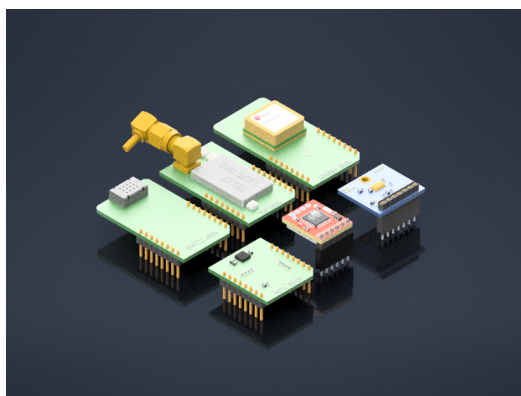
## 4.2 Mechanická zástavba

Součástí práce je i mechanická zástavba kryt 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.

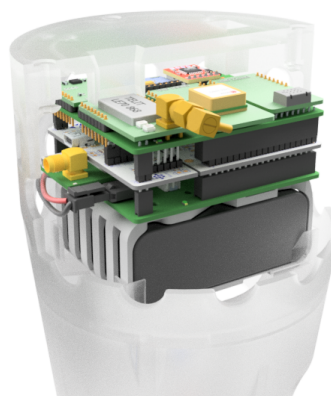
Díky jednotlivým modelům bylo možné vytvořit kompletní model elektronické části, kolem kterého byl poté vymodelován kryt (obr. 4.5b). Kryt byl modelován s ohledem na anténu umístěnou ve spodní části. Stěny kolem antény jsou ztenčené, aby co nejméně ovlivnily ladění antény na 868 MHz. Malá mechanická odolnost stěn je kompenzována čtyřmi výztužkami vedoucí po obvodu stěny.



Obrázek 4.4: Příklad ošetření vstupů TVS diodami



(a) : Vymodelované moduly



(b) : Řez vrchní částí 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 podstavům. Naopak materiál byl potřeba na plášť 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

## 4.3 Firmware

### 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);
```

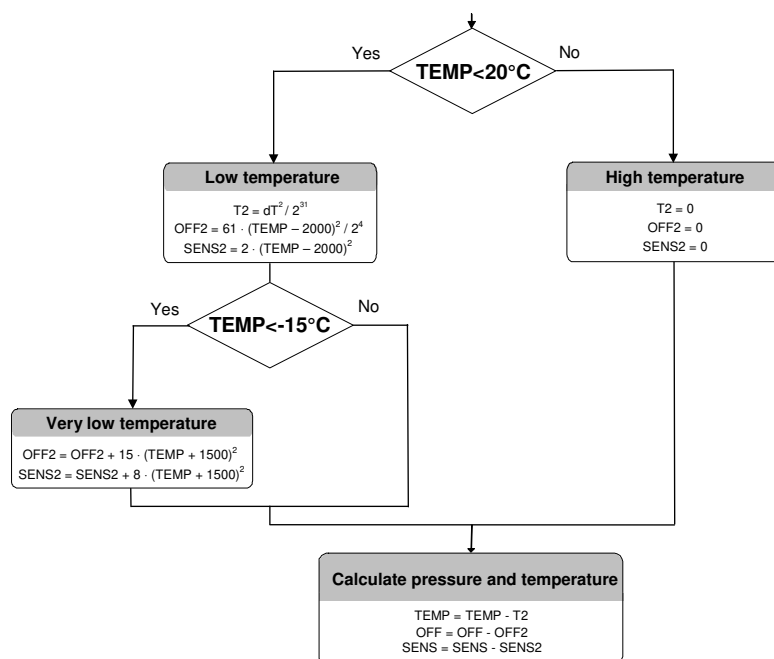
Senzor následně vyšle data obsahující informace o vlhkosti a teplotě. Jejich příjem zajišťuje funkce

```
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.



**Obrázek 4.6:** 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_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. 4.6.

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, NumByteToRead, HAL_MAX_DELAY);
```

### 4.3.2 Zjištění náklonu sondy

TODO:

1. Obr. kyvadla a sil - nelze měřit náklon pomocí acc
2. Nelze měřit přes mag - vizualizace rotace kolem vektoru mag. pole
3. Řešení v flightcontrollerech na dronech - kalman, příliš složité na implementaci, komplementární filtr
4. Moje řešení

parsování příchozích dat, doplnění NMEA zprávy pro tracker, python - parsování a přepočítání souřadnic, zobrazení na mapě, zobrazení v terminálu

## 4.4 Software pro zobrazení telemetrických údajů

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

## 4.5 Testování a měření

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 °C. Celkem byly měřeny 4 směrové charakteristiky

a to pro různá natočení sondy kolem své osy. Směrové charakteristiky jsou zaneseny na (obr)

TODO - graf směrových charstik.

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 znárorněn na obr. xxx.

TODO - graf polarizace

směrová charakteristika, teplotní odolnost v klimakomoře, proudový odběr telitu, výlet na Říp, mapa viditelnosti z bodu na mapě.



## Kapitola 5

### Experiment

příjem dat, umístění antény na střeš e , nastavení spektráku



#### 5.1 Průběh experimentu

jak to probíhalo, co se stalo, proč sonda přestala vysílat, proč doletěla jen do 17 km, nalezení pomocí sondy čhmú, sundání sondy



#### 5.2 Naměřená data

co bylo na SD kartě, výsledky měření - čístě změřená data





## Kapitola 6

### Výsledky



#### 6.1 Výstup z experimentu

výsledky, co bylo změřeno a zjištěno



#### 6.2 Zpracování dat

zkombinovat data ze země a data ze strato, vzorečky, určit refrakci, výkonovou bilanci podle podmínek, vzít v potaz směrovou charstiku. vyrobit model šíření, grafy







## Kapitola 7

### Závěr



#### 7.1 Shrnutí experimentu

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



#### 7.2 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**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák**

Jméno: **Jakub**

Osobní číslo: **492178**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací 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:

Navrhnete a realizujete 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 měřicím systému balónu.

Na základě parametrů vysílaného / přijímaného signálu a informací z telemetrie 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](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