

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

1 Úvod	1	3.4 Firmware sondy	10
2 Cíl práce	3	3.4.1 Obsluha senzorů	10
2.1 Šíření vln ve troposféře	3	3.4.2 Zjištění náklonu sondy	12
2.2 Způsob řešení / návrh experimentu	3	3.5 Pozemní stanice	13
2.2.1 Měřená data	3	3.6 Software pro zobrazení telemetrických údajů	13
2.3 Součásti experimentu.....	4	4 Realizace	15
3 Návrh systému	5	4.1 Elektronika	15
3.1 Požadavky	5	4.1.1 Testování modulů	15
3.2 Elektronika sondy	6	4.1.2 Realizace elektroniky	15
3.2.1 Způsob řešení elektroniky	6	4.2 Mechanická zástavba	16
3.3 Použité komponenty	7	4.3 Firmware	18
3.3.1 GPS modul	7	4.4 Software	18
3.3.2 Teplotní a tlakový senzor	8	4.5 Testování a měření.....	18
3.3.3 Vlhkostní senzor	8	5 Experiment	19
3.3.4 Senzor orientace	9	5.1 Průběh experimentu	19
3.3.5 Napájení.....	9	5.2 Naměřená data	19

6 Výsledky	21
6.1 Výstup z experimentu	21
6.2 Zpracování dat	21
7 Závěr	23
7.1 Shrnutí experimentu	23
7.2 Možná vylepšení	23
A Literatura	25
B Zadání práce	27

Obrázky

3.1 Schéma spínaného zdroje umístěného na spodní redukční desce	10
3.2 Schéma lineárních regulátorů umístěných na horní redukční desce	10
3.3 Vývojový diagram pro kompenzaci měřených hodnot senzorem MS5607, převzato z https: //www.parallax.com/package/ altimeter-module-ms5607-datasheet/	12
4.1 Redukční desky pro moduly	16
4.2 Příklad ošetření vstupů TVS diodami	16

Tabulky

3.1 Mody GPS přijímačů u-blox	8
3.2 Rozsah senzoru MS5607, převzato z https: //www.parallax.com/package/ altimeter-module-ms5607-datasheet)	8



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 musela být sonda schopna operovat za nízkého tlaku a teploty, které panují ve vyšších vrstvách atmosféry. Toto se vztahuje jak na mikročipy a senzory, tak na baterie, používané k napájení sondy. Další podmínkou bylo 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, který dovoluje tzv. *airborne mode*, ve kterém není omezena pracovní výška.

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.

V samotném návrhu elektroniky sondy bylo možné zvolit jednu ze dvou cest. Níže práce popisuje výhody, nevýhody a možná rizika každé z nich. Dále zdůvodňuje cestu, která byla zvolena při řešení této práce. Zmíněny jsou jak robustnost řešení, tak možná rizika způsobené lidským faktorem a časová náročnost.

V dnešní době existuje velké množství mikročipů a MEMS čipů, které lze zakoupit ve formě modulů. Jedná se zpravidla o malé deky plošných spojů osazených konkrétními čipy s minimem potřebných součástek zajišťujících správné fungování. Zpravidla se jedná o blokové 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 Nucelo není tvořen s ohledem na malé rozměry a velikost PCB tohoto kitu ovlivňuje celkovou velikost elektroniky sondy.

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

■ 3.3 Použité komponenty

Níže jsou zmíněny druhy čidel, 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).

■ 3.3.1 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) 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 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).

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

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>)

3.3.2 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.

3.3.3 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>).

3.3.4 Senzor orientace

Pro zjištění orientace bylo použito senzoru MPU9250, který je součástí modulu 9DOF Click. Jedná se o gyroskop Sensor 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>).

3.3.5 Napájení

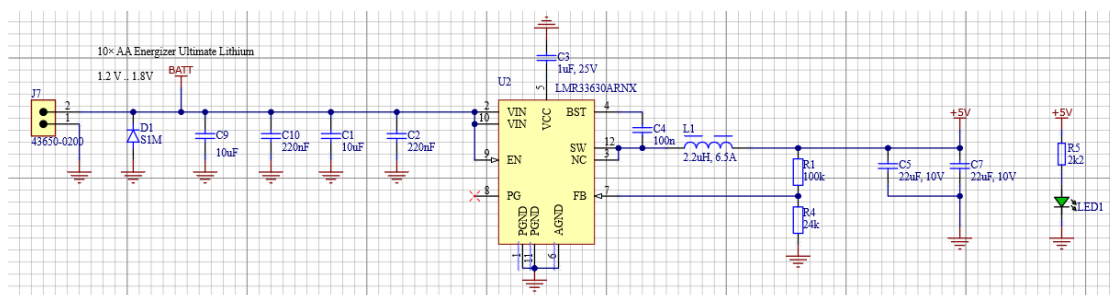
Jako zdroj energie po dobu letu byly vybrány tužkové baterie *Energizer ultimate lithium*. Dle technického listu (<https://data.energizer.com/pdfs/191.pdf>) jsou schopny ope-rovat až do teploty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ při poklesu kapacity z xxx na xxx mAh. S ohledem na teploty panující ve stratopauze,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

Zdroje

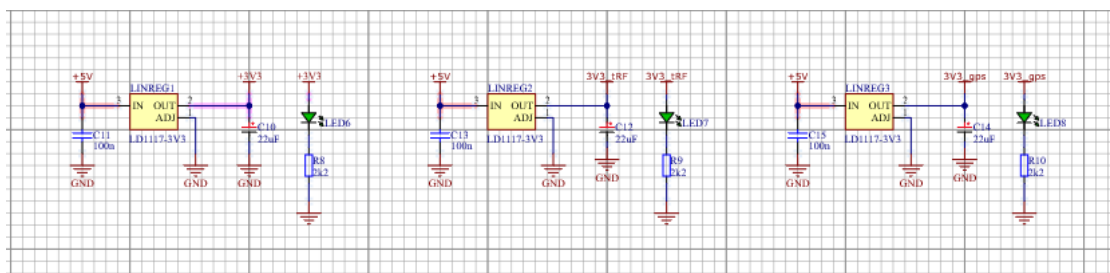
Vstupní napětí se v závislosti na teplotě a momentálním odběru pohybuje od 18 V do 10 V. Pro zvýšení účinnosti byl jako hlavní regulátor využit spínaný zdroj. S ohledem na dostupnost součástek a ověřenost funkčnosti byl vybrán spínaný zdroj *LMR33630* od firmy *Texas Instruments*. Účinnost tohoto zdroje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



Obrázek 3.1: Schéma spínaného zdroje umístěného na spodní redukční desce



Obrázek 3.2: Schéma lineárních regulátorů umístěných na horní redukční desce

lineární regulátor je určen pro radiový vysílač. Díky tomu nebude docházet k poklesu napětí napájení ve zbytku přístroje při vysílání dat.

3.4 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 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.

Kapitola 4

Realizace

4.1 Elektronika

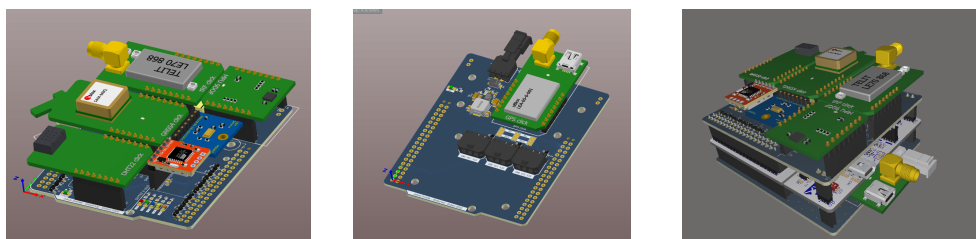
4.1.1 Testování modulů

měření odběru, energie pro posílání dat

4.1.2 Realizace elektroniky

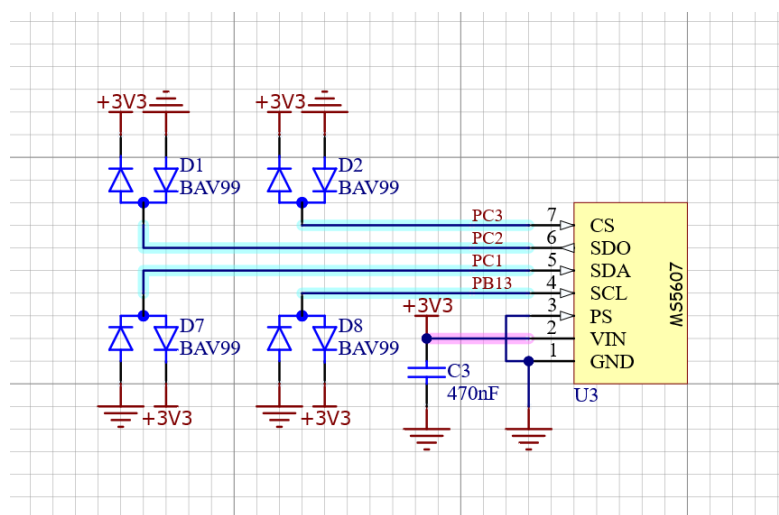
Připojení modulů

Ve vývojové fázi práce byly moduly zapojeny skrze nepájivé pole a propojeny propojovacími kabely s piny Nucleo desky. Moduly byly postupně přidávány 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



Obrázek 4.2: Příklad ošetření vstupů TVS diodami

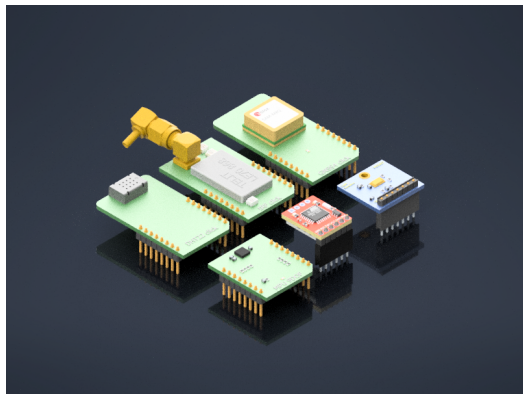
■ Ochrana pinů

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. 4.2.

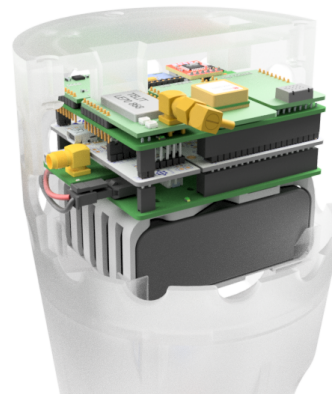
■ 4.2 Mechanická zástavba

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,



(a) : Vymodelované moduly



(b) : Řez vrchní částí krytu sondy

kolem kterého byl poté vymodelován kryt (obr. 4.3b). 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.

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 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:

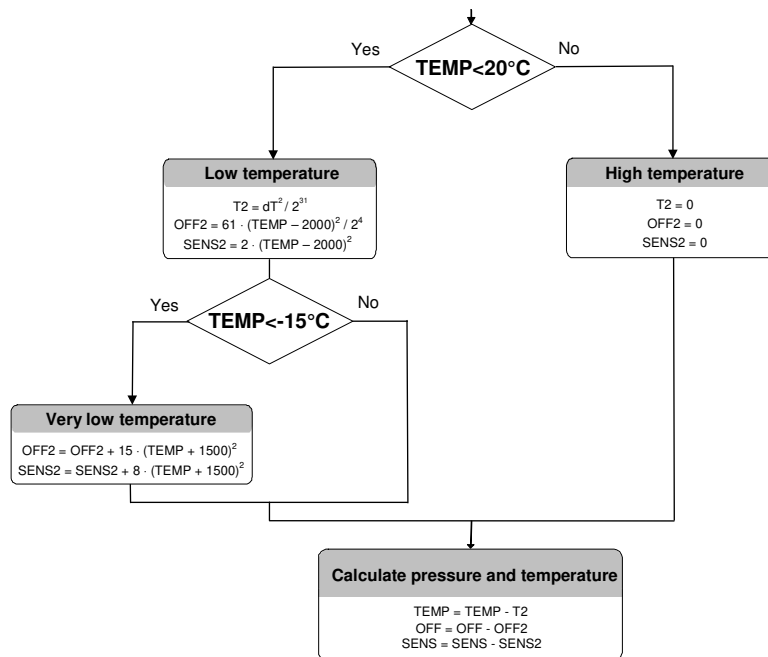
```
1 int16_t temp_temperature = (am2320->data[5] | am2320->data[4] << 8);
2 if (temp_temperature & 0x8000) {
3     temp_temperature = -(int16_t) (temp_temperature & 0x7fff);
4 } else {
5     temp_temperature = (int16_t) temp_temperature;
6 }
7 *temperature = (float) temp_temperature / 10.0;
8 *humidity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

```
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
```



Obrázek 4.4: Vývojový diagram pro kompenzaci měřených hodnot senzorem MS5607, převzato z <https://www.parallax.com/package/altimeter-module-ms5607-datasheet/>

```

5  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. 3.3.

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.

```

1  HAL_SPI_Receive(&MPU9250_SPI, pBuffer, NumByteToRead, HAL_MAX_DELAY);

```

■ 4.3.2 Zjištění náklonu sondy

Acc, vektor mag pole, kalmánův filtr, co bylo použito

■ 4.4 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.

■ 4.5 Software pro zobrazení telemetrických údajů

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.

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

■ 4.6 Software

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

4.7 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 znárodně 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:

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 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.

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