

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>
<b>2 Šíření vln ve troposféře</b>	<b>3</b>
<b>3 Cíl práce</b>	<b>5</b>
3.1 Způsob řešení / návrh experimentu	5
3.1.1 Měřená data	5
3.2 Součásti experimentu	5
<b>4 Návrh systému</b>	<b>7</b>
4.1 Požadavky	7
4.2 Hardware	8
4.2.1 Vývojové moduly	8
4.2.2 Samostatná deska plošných spojů	9
4.3 Firmware	9
4.3.1 Měření náklonu sondy	9
<b>5 Realizace</b>	<b>11</b>
5.1 Elektronika	11

5.1.1 Testování modulů	11
5.1.2 Realizace elektroniky	11
5.2 Mechanická zástavba	11
5.3 Firmware	12
5.4 Software	12
5.5 Testování a měření	12
<b>6 Experiment</b>	<b>13</b>
6.1 Průběh experimentu	13
6.2 Naměřená data	13
<b>7 Výsledky</b>	<b>15</b>
7.1 Zpracování dat	15
7.2 Výstup z experimentu	15
<b>8 Závěr</b>	<b>17</b>
8.1 Shrnutí experimentu	17
8.2 Možná vylepšení	17
<b>A Literatura</b>	<b>19</b>
<b>B Zadání práce</b>	<b>21</b>

Obrázky

Tabulky



# Kapitola 1

## Úvod

tato práce ze zabývá...







## Kapitola 2

### Šíření vln ve troposféře

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





## Kapitola 3

### Cíl práce



#### 3.1 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.



##### 3.1.1 Měřená data

jaká data budou měřena - podle literatury



#### 3.2 Součásti experimentu

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



## Kapitola 4

### Návrh systému

#### 4.1 Požiadavky

Z dôvodu dlhú čekaú doby na povolenú vypuútenú balónu, ktoré vydáva Úrad pro civilnú leteetví, bylo využito povolenú, ktoré má dlouhodobě sjednané ČHMÚ. Toto povolenú se vztahuje na vypouútenú 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 musela splňovat požiadavek na hmotnost do 516 g.

Dalším požiadavkem bylo posílání telemetrických údajů o poloze a ukládání zbylých 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.

Značná část GPS přijímačů je od výrobce zablokována pro použití ve výškách větších jak 10 km n. m. a bylo nutné zvolit přijímač, který dovoluje tzv. *airborne mode*, ve kterém není omezena pracovní výška.

Mechanická zástavba celé sondy musela splňovat požiadavky pracovníků ČHMÚ, aby nedošlo k poničení balónu a způsobení škod při dopadu na zem.

Jelikož byla sonda Vaisala RS41 pověšena pod sondu vznikající v rámci této práce, bylo nutné zajistit robustnost a zamezit odpojení sondy Vaisala, nebo rozpadu vyvíjené sondy.

## 4.2 Hardware sondy

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

### 4.2.1 Vývojové moduly

V dnešní době existuje veliké množství mikročipů a MEMS čipů, které lze zakoupit ve formě modulů. Jedná se zpravidla o malé desky 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 blokových 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.

## ■ 4.2.2 Samostatná deska plošných spojů

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 součásti 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.

## ■ 4.3 Firmware sondy

Firmware pro mikroprocesor v sondě zajišťuje 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 erorů, vyvolaných chybným čtením dat a nebo fyzickými podmínkami prostředí.

### ■ 4.3.1 Měření 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.





## Kapitola 5

### Realizace



#### 5.1 Elektronika



##### 5.1.1 Testování modulů

měření odběru, energie pro posílání dat



##### 5.1.2 Realizace elektroniky

Navrženy shieldy, nakresleny modely. Spínaný zdroj + LDO, ochrany vstupů, volné GPIO na rozšíření



#### 5.2 Mechanická zástavba

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

### ■ 5.3 Firmware

výstřížky 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

### ■ 5.4 Software

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

### ■ 5.5 Testování a měření

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



## Kapitola 6

### Experiment

příjem dat, umístění antény na střeše, nastavení spektráku



#### 6.1 Průběh experimentu

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



#### 6.2 Naměřená data

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





## Kapitola 7

### Výsledky



#### 7.1 Zpracování dat

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



#### 7.2 Výstup z experimentu

výsledky, co bylo změřeno a zjištěno





## Kapitola 8

### Závěr



#### 8.1 Shrnutí experimentu

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



#### 8.2 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**  
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:

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