

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Aplikace meteorologických balonů pro testování kosmických přístrojů

Bc. Martin Němec

Vedoucí práce: doc. RNDr. René Hudec, CSc.

Studijní program: Kybernetika a robotika

Obor: Kybernetika a robotika

Květen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němec** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **457200**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aplikace meteorologických balonů pro testování kosmických přístrojů

Název diplomové práce anglicky:

Application of meteorological balloons for testing of space instruments

Pokyny pro vypracování:

Současný rychlý rozvoj nanosatelitů a jejich aplikací miniaturizuje řadu palubních přístrojů těchto malých družic. To otevírá možnosti realizovat jejich testy na menších, finančně dostupných balonech dosahujících výšek až kolem 50 km nad zemským povrchem. Je to však podmíněno dostupností vhodného servisního speciálního vybavení balonového experimentu.

Proveďte rešerši na téma možnosti aplikace balonů pro testování payloadů kosmických objektů. Prostudujte minulé, současné i plánované experimenty v této oblasti, proveďte shrnutí a diskuzi.

Navrhněte cost effective řešení balonového experimentu realizovatelného v podmínkách ČVUT, konkrétně systémů stratosférického balonu umožňujícího testovat kosmické senzory v podmínkách balonového stratosférického letu:

- Návrh a vývoj elektroniky pro stratosférický meteorologický balon s vlastním plošným spojem, senzory, výkonným procesorem, ukládáním dat na SD kartu
- Tvorba programu do PC, pro dekódování dat uložených na SD kartě z balonu, transfer dat z rádiové komunikace a jejich zobrazení, se schopností odesílat balonu příkazy, popřípadě vykreslovat v mapě pozici balonu z GPS dat.
- Tvorba software pro všechny použité mikrokontroléry i software řízení letu a dekódování uložených dat pro PC
- Realizace a pozemní testování.
- Studium možnosti připojit k elektronice payload, tedy možnost testovat senzory/zařízení vyvíjené pro kosmické aplikace v podmínkách balonového letu ve stratosféře.

Zvažte a analyzujte možnosti získání vědecky hodnotných dat při testovacím balonovém experimentu např. studii možnosti výzkumu zdrojů pozemních gama záblesků v oblasti tropických bouří a s tím související problematikou balonového experimentu v extrémních povětrnostních podmínkách.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Nobuyuki Yajima, Naoki Izutsu, Takeshi Imamura, Toyoo Abe ,
- [2] Scientific Ballooning: Technology and Applications of Exploration Balloons Floating in the Stratosphere and the Atmospheres of Other Planets (Lecture notes in mathematics ; 768) 2009th Edition, Springer, ISBN-13: 978-0387097251, ISBN-10: 0387097252
- [3] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.866.2035&rep=rep1&type=pdf>
- [4] https://www.researchgate.net/profile/Jun_Nishimura2/publication/223862819_Scientific_ballooning_in_the_20th_century_A_historical_perspective/links/558b885592851c1e124110bc/Scientific-ballooning-in-the-20th-century-A-historical-perspective.pdf
- [5] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6662212/>
- [6] <https://cds.cern.ch/record/962450/files/13405-usa-jones-WV-abs2-og15-poster.pdf>
- [7] https://www.researchgate.net/publication/220014841_Terrestrial_gamma_ray_flashes_and_lightning_discharge
- [8] https://www.researchgate.net/publication/216776009_Terrestrial_gamma-ray_flash_production_by_lightning

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. RNDr. René Hudec, CSc., katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2020/2021

doc. RNDr. René Hudec, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

V úvodu bych rád poděkoval doc. RNDr. Renému Hudcovi, CSc. za umožnění práce na toto téma a za jeho trvalou odbornou konzultaci v průběhu tvorby mé diplomové práce. Velké poděkování patří celé mojí rodině za neustálou podporu v průběhu mého studia i poskytnutí studijních materiálů k této práci. V neposlední řadě děkuji Ing. Martinovi Hlinovskému, Ph.D. za zpřístupnění laboratoře v nepříznivých časech COVID-19.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 22. května 2020

.....

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí malé, cenově dostupné gondoly meteorologického balónu určené k testování kosmických senzorů a systémů v podmínkách stratosférického letu. Současně je vytvořena pozemní stanice pro komunikaci rádiovým spojením. Jsou napsány řídicí programy pro všechny užívané mikrokontroléry, a také počítačová aplikace určená k řízení letu. S uvedeným zařízením bylo provedeno několik pozemních testů.

Klíčová slova: meteorologický balón, cenově dostupná balónová elektronika, pozemní stanice, payload

Vedoucí práce: doc. RNDr. René Hudec, CSc.

Abstract

This thesis describes the design and construction of a small, low cost weather balloon gondola, designated to test space sensors and systems in stratospheric flight conditions. A ground station for radio communication is also created. Control programs are written for all used microcontrollers, as well as a computer application designed for flight control. Several ground tests were performed with this device.

Keywords: weather balloon, low cost balloon electronics, ground station, payload

Title translation: Application of meteorological balloons for testing of space instruments

Přílohy	
A Literatura	49
B Obsah přiloženého CD	53

Obrázky

2.1 Struktura stupňů platformy Bloostar (zdroj zero2infinity.space)	13	3.11 Vnitřní kryt balónové elektroniky (pozn.: víko bez otvoru pro plochý kabel)	29
3.1 Mikrokontroléry ATmega2560 a ATmega328P, zdroj Microchip Technology Inc.	19	3.12 Vnější kryt balónové elektroniky	30
3.2 Rádio Ra-02 (vlevo), GSM modul SIM800C (vpravo), zdroj SIMCom Wireless solutions Ltd.	20	4.1 Grafické uživatelské rozhraní aplikace monitorování letu	37
3.3 GPS přijímač NEO-6M (vlevo), kamera SQ19 (vpravo)	21	5.1 Trasa pohybu balónové elektroniky při experimentu (vytvořeno v GPSVisualizer.com)	40
3.4 Blokové schéma pozemní stanice	23	5.2 Nadmořská výška během experimentu měřená barometrem a GPS	41
3.5 Náskres plošného spoje pozemní stanice	24	5.3 Průběhy měřených teplot během testu v mrazícím boxu	42
3.6 Blokové schéma elektroniky balónu	24	5.4 Průběhy napětí a proudu z akumulátoru spolu s měřenou silou GSM signálu	43
3.7 Náskresy plošných spojů hlavní desky (vlevo) a senzorické desky (vpravo)	26	5.5 Průběhy měřených teplot spolu s intenzitou UVA záření	44
3.8 Osazený plošný spoj pozemní stanice, horní (vlevo) a spodní strana (vpravo)	27		
3.9 Osazené plošné spoje, hlavní deska (vlevo), senzorická deska (vpravo), přední (nahore) a zadní strany (dole)	28		
3.10 Kryt pozemní stanice	28		



Kapitola 1

Úvod

Balónové lety jsou doménou posledních dvou století. Kromě jejich původního využívání k pozorování vlastností atmosféry a studování kosmických paprsků našly v posledních sedmdesáti letech také užití pro testování přístrojů a technologií vyvíjených pro činnost v kosmu. Díky jejich nízkým provozním nákladům představují oproti raketám velmi vhodný dopravní prostředek do blízkého vesmíru, kde lze otestovat zařízení před jejich vypuštěním do kosmu, a zabránit tak později neopravitelným chybám v návrhu.

Teoretická část této práce rekapituluje historii vývoje balónů a balónových experimentů, popisuje typy používaných balónů a seznamuje s několika uskutečněnými i plánovanými testy vesmírného vybavení s využitím stratosférického balónového letu. V praktické části je proveden výběr komponent vhodných pro cenově efektivní servisní elektroniku letu pryžového balónu umožňující připojení testovaného subjektu (payloadu). Je diskutována konstrukce plošných spojů a mechanického krytu následována vývojem řídicích programů použitých mikrokontrolérů a vývojem počítačové aplikace pro řízení letu. Praktická část je zakončena pozemními testy vyvinutého zařízení.



Část I

Teoretická část

Kapitola 2

Balónové lety a experimenty

Všechny balónové lety jsou založeny na principu vztlaku, který je popsán Archimédovým zákonem: „Každý objekt, který je částečně nebo zcela ponořen do tekutiny, je nadlehčován silou rovnající se tíze tekutiny vytlačené tímto objektem.“ Takto popisuje vztlak Archimédes ve svém díle *On Floating Bodies*, které pochází přibližně z roku 250 př. n. l. Vztlaková síla \mathbf{F}_{vz} tedy působí v opačném směru než síla gravitační \mathbf{F}_g . Z toho vychází tři možné stavy:

1. $|\mathbf{F}_g| > |\mathbf{F}_{vz}|$, objekt v tekutině klesá směrem působení \mathbf{F}_g
2. $|\mathbf{F}_g| = |\mathbf{F}_{vz}|$, objekt se v tekutině volně vznáší
3. $|\mathbf{F}_g| < |\mathbf{F}_{vz}|$, objekt v tekutině stoupá směrem působení \mathbf{F}_{vz}

Ke třetímu stavu dochází v případě, kdy je průměrná hustota objektu nižší než hustota tekutiny. Lidstvo vztlakovou sílu využívalo tisíce let před Archimédem v podobě lodní dopravy po řekách či mořích, kde stačilo zajistit, aby měla ponořená část objektu (lodi) nižší průměrnou hustotu než má voda. Nicméně pro pohyb v atmosféře je nutné, aby byla průměrná hustota objektu nižší než hustota vzduchu. První takový nápad se objevil v 13. století, k jeho uskutečnění ale došlo až ve století 18.

2.1 Historie a vývoj balónů

Zhruba v polovině 13. století přišel anglický filozof Roger Bacon s nápadem vytvořit balón z tenké měděné fólie a naplnit ho "tekutým ohněm". To poukazuje na myšlenku balónového plnění, které je lehčí než vzduch. [1]. O čtyři století později, v roce 1670, publikoval italský jezuitský kněz Francesco Lana de Terzi knihu *Prodromo*, jejíž součástí byl popis létající lodi na principu vakuových balónů (opět tenká měděná fólie udržující vakuum) [1]. Tuto myšlenku však o čtyřicet let později vyvrátil G. W. Leibniz jako nerealizovatelnou s ohledem na tehdy známé materiály. V průběhu následujícího století navrhl Joseph Black, že by bylo možné plnit balóny vodíkem.

Experimenty s vodíkem zaujaly známé bratry J. M. a J. É. Montgolfiery, kteří pocházeli z rodiny výrobce papíru. Zkoušeli plnit papírové pytlíky vodíkem, ale zjistili, že papír vodík neudrží. Později přešli na experimenty s horkým vzduchem, které byly úspěšné. Při konstrukci větších balónů se papír ukázal jako nevhodný materiál, a tak byly balóny dále konstruovány z látky. Dne 4. června 1783 bratři uskutečnili první neřízený balónový let demonstrováný před veřejností s doletovou vzdáleností zhruba 2km. Po tomto úspěchu demonstrovali bratři 19. září téhož roku balónový let před králem Ludvíkem XVI., tentokrát však do balónové gondoly byla umístěna tři zvířata: kohout, kachna a ovce. Let opět proběhl úspěšně, po 3 kilometrech balón bezpečně přistál a všechna zvířata přežila. A tak již nic nebránilo prvnímu člověkem řízenému letu, který se uskutečnil 21. listopadu, taktéž roku 1783. Balón pilotovali P. Rozier a F. d'Arlandes a při průletu nad Paříží překonali vzdálenost devíti kilometrů s bezpečným přistáním [2].

Mezitím se Jacques Charles věnoval stavbě balónu plněného vodíkem. Bratři Robertovi mu pomohli s vývojem technologie vzduchotěsného materiálu - gumu rozpuštěnou terpentýnem nanášeli na hedvábné plátno, které následně sešili do tvaru balonu. První funkční prototyp plynem plněného balónu byl otestován dne 27. srpna 1783. Balón byl poměrně malý, a tak měl nosnost pouhých 9kg. Nesloužil tedy k přepravě objektů, ale pouze k otestování technologie. Za 45 minut letu urazil vzdálenost 21 kilometrů, po přistání ho však zničili vyděšení rolníci. Po tomto úspěchu Charles sestavil větší balón obklopený sítí, na kterou byla připevněna gondola. Vzhledem k tomu, že balón musel být uzavřený, aby vodík neunikal, Charles jej vybavil ventilem, díky kterému bylo možné vypouštět vodík a regulovat tak stoupání. Následně Charles spolu s Nicolasem Robertem uskutečnili dne 1. prosince 1783 řízený let, o prvenství však byli připraveni deset dní předem Montgolfierovými. Jejich let byl však úspěšnější - za dvě hodiny urazili ve výšce zhruba 550 metrů vzdálenost 36 kilometrů a po přistání a vystoupení N. Roberta Charles znovu prudce vzletěl do výšky tří kilometrů. Následně byl nucen kvůli bolesti v uších

opět přistát. A tak byly položeny technické základy pro budoucí vzducholodní dopravu, ale i vědecké balónové lety [2].

2.2 Historie balónových vědeckých experimentů

První vědecký experiment provedla dvojice francouzských vědců J-L Gay-Lussac a J-B Biot. Vystoupali do nadmořské výšky čtyř kilometrů, aby zkoumali, jak se s rostoucí výškou mění magnetické pole Země a složení atmosféry. Nedlouho poté sám Gay-Lussac absolvoval další balónový let, vybaven teploměrem, tlakoměrem a vlhkoměrem. Vystoupal až do sedmi kilometrů bez dýchacího přístroje [2]. Další experiment, který rozhodně stojí za zmínku, provedl Rakušan Victor Hess. V letech 1911-1913 několikrát vystoupal do nadmořské výšky pěti kilometrů vybaven ionizační komorou, pomocí které zaznamenával změnu radiace s nadmořskou výškou. Hess pozoroval, že radiace ve směru stoupání roste, a tak usoudil, že musí jít o záření přicházející z vesmíru, nikoli ze Země. Tato hypotéza byla později ověřena, částice způsobující tuto radiaci byly pojmenovány jako Kosmické paprsky a Hess za toto pozorování obdržel v roce 1936 Nobelovu cenu [2].

Počátkem třicátých let minulého století začal Auguste Piccard konstruovat vzduchotěsnou hliníkovou kabinu tvaru koule, se kterou by bylo možné letět mimo dýchatelnou atmosféru. V roce 1931 spolu s P. Kipferem v této kabině vystoupali do nadmořské výšky zhruba 15,8 km a stali se tak prvními muži ve stratosféře. Při letu opět zkoumali vlastnosti atmosféry a Kosmických paprsků. Piccard později podnikal další výškové lety, a to až do 23 km nadmořské výšky [2].

V průběhu třicátých a čtyřicátých let téhož století byla vyvinuta polyetylenová fólie, která se díky svým vlastnostem (velmi tenká, lehká a pevná) okamžitě začala využívat pro stratosférické lety. Později byly vyvinuty další typy fólií, které si zachovávaly své vlastnosti i při velmi nízkých teplotách, a tak bylo možné vysílat experimenty bez problému do 30 km. Současně došlo i k vývoji elektroniky, která umožňovala provoz bezpilotních letů s mnohem delší letovou dobou i větší nadmořskou výškou díky zmenšení a tedy i odlehčení balónového nákladu [2]. V roce 1957 byl vypuštěn teleskop *Stratoscope I*. Projekt vznikl pod vedením M. Schwarzschilda a měl za cíl snímat povrch Slunce bez zkreslení atmosferickými turbulencemi. Teleskop byl vybaven automatickým řízením a fotoaparátem na film. Při pozdějších experimentech byl vylepšen o televizní kameru a dálkové ovládání ze Země [3]. Po úspěchu tohoto teleskopu byla vyvinuta druhá verze *Stratoscope II*, která létala v letech 1963-1971. Ovládání již bylo řízeno dálkově a experi-

Další zajímavou skupinou jsou planetární balóny, které slouží k průzkumu jiných planet nebo měsíců s atmosférou. První návrhy na tyto mise se objevily v padesátých a šedesátých letech 20. století. V roce 1985 byly ve spolupráci Sovětského vesmírného programu a francouzského CNES vyslány sondy Vega 1 a 2 s cílem průzkumu Venuše a v blízkosti prolétající Halleyovy komety. Obě sondy vypustily planetární balóny, které měly letět ve výšce zhruba 50 km nad povrchem. Oba balóny vysílaly data necelé dva dny, což byla životnost jejich baterií. Po tomto úspěchu autoři mise pracovali na planetárním balónu pro průzkum Marsu. Projekt byl ve stádiu pozemních testů, v roce 1992 byl ale kvůli nedostatku financí odložen a v roce 1996 úplně zrušen. Laboratoř proudového pohonu (JPL) agentury NASA plánovala mnoho planetárních balónů, konkrétně na Venuši, Mars a Saturnův měsíc Titan. Ten je pokryt smogovou vrstvou, skrze kterou není na povrch vidět, balón by tak byl vhodný pro nahlédnutí pod tuto vrstvu. Poslední možnou destinací jsou Plynní obři, jejichž vrchní vrstvy se skládají z vodíku a helia. Pro ně je tedy vhodný balón typu MIR. Žádná z těchto misí ale nebyla zatím uskutečněna, a tak zůstává Vega jediným planetárním balónem [2].

2.3 Typy a tvary balónů

První skupinou jsou fóliové balóny, často také označované jako stratosférické balóny. Jejich obálka je tvořena velmi tenkým polyethylenovým filmem o tloušťce v řádech jednotek až desítek mikrometrů. V minulosti byly využívány tvary sférické, cylindrické a čtyřstěnné. Těchto tvarů však balóny dosahují až při plné inflaci. Před tím dochází ke vzniku velkého množství skladů fólie, které způsobují nerovnoměrné namáhání. Toho si všiml R. H. Upson a v roce 1939 formuloval přirozený tvar balónu (Natural shape) [5], který zachovává svůj tvar po celou dobu vzestupu. Obálka je vytvořena vertikálním spojením dlouhých pruhů fólie. Pro zpevnění a rovnoměrné rozprostření tahové síly gondoly mohou být přidány nosné pásy (load tapes) umístěné podél spojů pruhů fólie.

Balóny jsou plněny nejčastěji vodíkem nebo heliem. Při startu jsou naplněny pouze z části, jelikož s rostoucí nadmořskou výškou a tedy klesajícím atmosférickým tlakem se plnicí plyn roztahuje a spolu s ním expanduje i obálka až do výrobních rozměrů. Materiál obálky je předpokládán jako neroztažitelný, a tak je při maximální inflaci dosažena hranice dostupné nadmořské výšky. Některé balóny jsou zespodu otevřené a v případě plného nafouknutí přebytečný plyn přeteče. Takovéto balóny jsou nazývány jako beztlakové (zero-pressure). Jejich velkou nevýhodou je vysoká ztrátovost plnicího plynu při střídání dne a noci. V opačném případě, pokud je balón plně uzavřen, je označován jako přetlakový (super-pressure). Tento typ balónů je poměrně

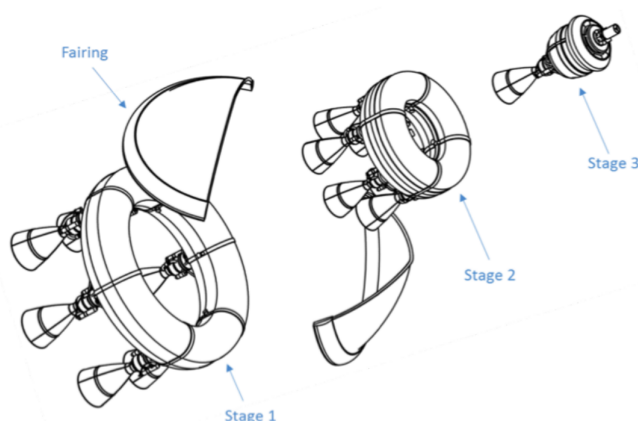
měření je vyhodnoceno z GPS souřadnic, které odesílá gondola rádiovým spojením. Jejich dosah je do 20 km nadmořské výšky a mohou obsahovat i senzory k měření teploty, vlhkosti a tlaku. Šestisetgramové balóny měří stejné parametry jako dvěstěgramové s tím, že dosahují nadmořské výšky až 30 km. Pro složitější měření vyžadující těžší přístroje (např. měření ozónu) jsou určeny balóny 2000 g. Velikost pryžových balónů je omezena technologií jejich výroby. Tvar balónu je formován vložením latexu do sférické kovové formy, která je následně rotována ve dvou osách, a tím je latex rozprostřen rovnoměrně po jejím povrchu. Největší balóny dosahují až 4500 gramů s maximální nosnou hmotností do 10 kg [2].

2.4 Aplikace balónů pro testování kosmických zařízení

Již v 50. a 60. letech 20. století byly prováděny testy kosmických přístrojů a skafandrů v podmínkách blízkého vesmíru za pomoci stratosférických balónů. V 70. letech následovaly testy tepelných štítů pro přistávací moduly určené misím Viking 1 a 2 na Mars, jelikož se stratosféra částečně podobá atmosféře na Marsu. Ze stejného důvodu zde byly testovány i planetární balóny určené k průzkumu Marsu, jejichž mise však dosud nebyly realizovány. V 80. letech byly využity stratosférické balónové lety k otestování dynamiky zmenšených modelů raketoplánů Hermes (ESA) a Hope (tehdy japonská NASDA a NAL, dnes JAXA). V 90. letech byl vynesena do stratosféry plně funkční návratový modul ARD (Atmospheric Re-entry Demonstrator) agentury ESA o hmotnosti necelé 4 tuny (včetně gondoly) [7].

Následně byl takto také otestován model kluzáku BLRV (Balloon Launched Recovery Vehicle) vyvíjený firmou Raven Industries (Smith a Allison, 1999). Projekt si kladal za cíl optimalizovat podmínky balónového vzletu a přistání. Vítr při vzletu měl být eliminován startem z pohybující se lodi stejnou rychlostí i směrem a přistání provedeno automaticky na předem zvolené místo. Kluzák měl sloužit pro transport payloadu (převážně mikrosatelitů) do blízkého vesmíru (až 200 km), a to nejprve vynesemím balónem do nadmořské výšky cca 23 km a následným balistickým letem za pomoci vestavěného hybridního raketového motoru. Test byl z části úspěšný, byl ověřen statický start z pohybující se lodi, i komunikace s kluzákem a jeho návrat. Byla však odhalena zásadní chyba v zapalování raketového motoru, které nebylo přizpůsobeno velmi řídké atmosféře a selhalo [7].

S prudkým vývojem elektroniky nastal i prudký vývoj v oblasti kosmických přístrojů a senzorů. Současná finanční dostupnost transportu na místo jejich



Obrázek 2.1: Struktura stupňů platformy Bloostar (zdroj zero2infinity.space)

Ačkoli na první pohled nejsou balónové experimenty viditelné veřejnosti jako třeba raketové lety, balóny stojí za vznikem a zdokonalením spousty úspěšných kosmických misí a technologií - od materiálového testování, přes komunikaci, až po sensorické vybavení. Za posledních 70 let využívání pro tyto účely nenastal pokles jejich výskytu, jejich budoucnost se naopak zdá být ještě bohatší např. díky projektům podobným Bloostar.

2.5 Aplikace stratosférických balónů pro nové vědecké úkoly

V následujících kapitolách je studován a navržen balónový experiment, který kromě primárního zadání, tedy pro testy payloadů a sensorů vyvíjených pro kosmické aplikace, najde uplatnění i v dalších oblastech, zejména v možnosti realizace inovačních vědeckých experimentů.

Jednou z atraktivních aplikací může být výzkum pozemních záblesků kosmického záření TGF (Terrestrial Gamma Ray Flashes), které vznikají v oblastech tropických bouří, a mohou po krátkou dobu záblesku nést energie až 200 MeV. Jejich pochopení a studium jsou dosud velmi omezená. Právě experiment vyvíjený týmem na Katedře radioelektroniky FEL ČVUT, a to malý rentgenový širokoúhlý monitor typu račí oko s detektorem Timepix (Hudec et al., 2017 a 2018), by mohl být vypuštěn na stratosférickém balónu do oblasti předpokládaného výskytu. Experiment by mohl poprvé poskytnout zobrazení tohoto jevu v rentgenovém oboru spektra. Výška dosažená pryžovým stratosférickým balónem je pro tento výzkum dostačující a stejně tak nosnost balonu, jelikož jde o malý a lehký experiment řádu 1 kg. Širokoúhlé zobrazení znamená nižší nároky na zaměření a orientaci přístroje [11][12][13].



Část II

Praktická část

Kapitola 3

Elektronika a mechanická konstrukce

Vědečtí pracovníci ČVUT vyvíjejí nejrůznější senzory a technologie. Některé z nich jsou určeny pro využití v kosmu (např. rentgenový teleskop s optikou typu "Račí oko"). Dostat testované subjekty do vesmíru je však velmi nákladné, a proto je vhodné před tímto krokem provést kromě pozemních testů také testy v prostředí podobném jejich určené destinaci. Za tímto účelem je vypracována následující studie a návrh nízkorozpočtového řešení malého balónového experimentu realizovatelného v podmínkách ČVUT, konkrétně gondola stratosférického balónu umožňující testovat kosmické senzory a systémy (rozměrově odpovídající přístrojům pro cubesaty) v podmínkách stratosférického letu.

Aby bylo možné testovat zařízení (payload) ve stratosféře, jsou kromě samotného balónu, který zajistí transport, zapotřebí další subsystemy. Komunikační subsystem je nezbytný minimálně k nalezení balónu při návratu na zem. Je však vhodné mít s experimentem spojení po celou dobu letu, aby bylo možné ho lépe sledovat a v některých případech je i vhodné elektroniku dálkově ovládat (vynucený restart, vynucené odpojení elektroniky od balónu). Napájecí subsystem je zdrojem energie pro payload, ale i ostatní subsystemy. Umožňuje také vypnutí či zapnutí přívodu elektrické energie pro payload. Řídící jednotka - OBC (On-board computer) zajišťuje komunikaci všech subsystemů a zároveň může sloužit k ukládání dat (letová data - pozice, teplota; data z testovaného payloadu) na místní médium. V neposlední řadě je třeba také vyřešit obal a izolaci elektroniky, které zajišťují provozní teplotu a chrání před povětrnostními podmínkami (voda, vítr). V některých případech může být nutné aktivní vyhřívání, nebo naopak chlazení.

Pro příjem dat z komunikačního subsystému je třeba mít pozemní stanici. Tu lze realizovat rádiovým přijímačem připojeným k počítači, který data dekoduje a zobrazí operátorovi letu. Zároveň je vhodné přijímaná data ukládat, kdyby došlo k poškození úložiště elektroniky balónu nebo k jeho nenalezení po návratu na zem.

3.1 Celkový návrh a výběr komponent

Původní představa principu funkce elektroniky byla následující: OBC vyčítá letová data ze senzorů a experimentální data z payloadu a ukládá je na paměťovou kartu. Aby bylo možné zařízení po návratu na zem najít, je pro získání přesné pozice použit GPS přijímač. Informace o pozici jsou periodicky odesílány rádiovým spojením na pozemní stanici. Pro případ přerušení rádiového spojení (např. kvůli překážkám nebo velké vzdálenosti) jsou poziční informace zároveň s větší periodou odesílány přes GSM modul. OBC kromě odesílání pozice také přijímá rádiovou komunikaci a vykonává příkazy (vyčtení hodnoty konkrétní měřené veličiny a její odeslání, usnutí senzorů).

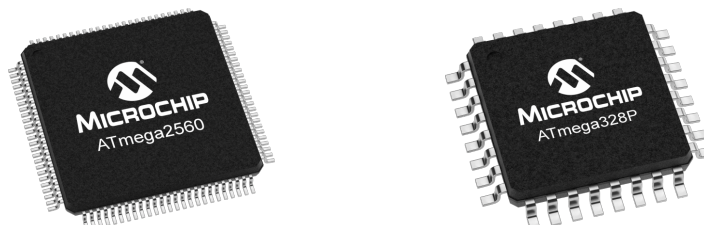
Proposal for balloon experiment [14] se zabývá stavbou jednoduché a levné balónové elektroniky. Projekt je založen na pospojování různých komerčně dostupných modulů, nicméně právě toto pospojování je mechanicky velmi náchylné k poškození. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto vytvořit vlastní plošný spoj nahrazující většinu modulů. Dále byl pro komunikaci dedikován samostatný mikrokontrolér, který umožní OBC věnovat procesorový čas jiným aktivitám. Toto oddělení komunikačního subsystému od OBC také umožňuje jednoduše hlavní procesor dálkově restartovat. Zároveň zajišťuje redundanci systému, jelikož GPS přijímač, jako hlavní zdroj sledování pozice, může být připojen k oběma procesorům. V případě, že by došlo k trvalému poškození OBC, je sám komunikační subsystém schopen odesílat pozici balónu rádiovým spojením. V případě trvalé poruchy komunikačního subsystému má OBC k dispozici GSM modul, pomocí kterého odesílá informace o pozici v SMS zprávě.

Díky miniaturizaci integrovaných obvodů je možné vestavět do balónové elektroniky mnoho senzorů pro sledování podrobností pohybu, nebo třeba vlastností atmosféry. Tyto senzory mají navíc minimální spotřebu elektrické energie, nezpůsobí tak samotné misi žádné problémy, a při experimentu je získáno mnoho zajímavých dat navíc.

■ Procesory

Pro funkci OBC byl vybrán mikrokontrolér Atmel ATmega2560 distribuovaný firmou Microchip. Tento procesor, založený na osmibitové architektuře typu RISC (Reduced instruction set computer), disponuje 256 kB programové paměti typu Flash, 8 kB operační paměti a 4 kB programovatelné paměti EEPROM. Ke komunikaci s okolím využívá celkem 86 digitálních vstupně-výstupních pinů, z čehož 16 lze připojit na desetibitový ADC (Analogově-digitální převodník), 12 pinů podporuje funkci PWM (Pulzně šířková modulační) s rozlišením 16 bitů, osm pinů má hardwarovou podporu pro čtyři sériové linky (UART), tři piny mohou sloužit pro sběrnici SPI (Serial Peripheral Interface), dva piny pro sběrnici I²C (Inter-Integrated Circuit) a 32 pinů podporuje přerušování vykonávání kódu, z nich 8 pinů nezávisle. Rozsah napájení je od 1.8 V do 5.5 V. Taktovací frekvence procesoru může být za použití externího oscilátoru až 16 MHz, v závislosti na napájecím napětí. Mikrokontroler má celkem 100 vývodů, proto je vyráběn pouze v SMD provedení ve dvou typech pouzder - TQFP a CBGA (tedy klasicky 4x25 vývodů po obvodu a matice 10x10 pájecích ploch respektive) [15].

Komunikační modul i pozemní stanice jsou řízeny mikrokontrolérem Atmel ATmega328P, který se v architektuře velmi podobá zmenšené verzi předešlého procesoru. Velikost programové paměti typu Flash je 32 kB, operační paměť SRAM (Static Random Access Memory) má 2 kB a EEPROM 1 kB. Procesor má 23 vstupně-výstupních digitálních pinů, z toho 6 PWM pinů s osmibitovým rozlišením, 6 pinů konfigurovatelných k analogově/digitálnímu převodu s rozlišením 10 bitů, jednu hardwarově podporovanou sériovou linku UART (Universal Asynchronous receiver-transmitter), jednu hardwarově podporovanou sběrnici SPI a jednu sběrnici I²C. Všechny piny mohou být konfigurovány k programovému přerušování, z nich dva piny nezávisle. Rozsah pracovního napětí je opět od 1.8V do 5.5V s přiměřeně odpovídající maximální taktovací frekvencí 20 MHz. Mikrokontrolér může mít v závislosti na provedení 28 nebo 32 vývodů (v provedení DIP, respektive SMD). V případě SMD provedení mají pouzdra oproti DIP provedení o 2 ADC piny navíc, které však nelze konfigurovat na digitální vstupy/výstupy [16].

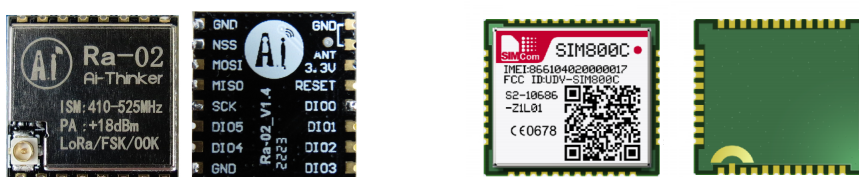


Obrázek 3.1: Mikrokontroléry ATmega2560 a ATmega328P, zdroj Microchip Technology Inc.

Komunikace

Hlavní komunikační kanál zajišťuje rádiový modul Ra-02 firmy Ai-Thinker, který je postaven na procesoru Semtech SX1278. Modul komunikuje v pásmu 410 - 525 MHz a kromě standardních modulací FSK, OOK (Frequency shift keying, On-off keying) umožňuje také použití modulace LoRaTM (Long Range). Tato modulace, založená na rozprostřeném spektru, má vysokou odolnost vůči rušení a velký dosah (jak název napovídá), při přímé viditelnosti jsou to desítky kilometrů. Pracovní napětí modulu je 2.5V - 3.7V a pro komunikaci je využita sběrnice SPI spolu se signálem přerušení programu při detekci nově příchozích dat [17][18].

V případě zarušení rádiového signálu jsou informace o poloze balónu odeslány SMS zprávou prostřednictvím mobilní telefonní sítě. Pro přístup do této sítě je používán GSM modul SIMCom SIM800C. Je to klasický čtyřpásmový modem (850/900/1800/1900 MHz) umožňující volání, posílání SMS zpráv a přenos dat pomocí GPRS. Modul je možné napájet v rozmezí od 3.4V do 4.4V. Komunikace s modulem je vykonávána přes sériové rozhraní UART pomocí standardních AT příkazů. Tento modul byl vybrán vzhledem k umístění pinů pouze po obvodu - to umožňuje snazší osazení [19].



Obrázek 3.2: Rádio Ra-02 (vlevo), GSM modul SIM800C (vpravo), zdroj SIM-Com Wireless solutions Ltd.

Senzory

Znalost polohy zařízení je zásadní informace pro jeho nalezení po návratu na zem. K tomuto účelu je použit GPS přijímač u-blox NEO-6M. Výrobce deklaruje inicializační dobu pod 30 s za podmínky použitelného signálu. Maximální nadmořská výška je u GPS přijímačů omezena, aby nemohly být zneužity jako naváděcí systém zbraní v podobě raket. Za předpokladu, že není překročena rychlost 500 ms^{-1} a přetížení $4g$, funguje tento přijímač až do výšky 50 km, což je naprosto dostačující pro balónové lety. Jeho pracovní napětí je mezi 2.7 V a 3.6 V a s okolím komunikuje přes UART, USB nebo SPI. Modul může využít externí paměť EEPROM pro uložení aktuálních pozic satelitů a po krátkodobém výpadku napájení se dokáže s uloženými informacemi inicializovat v řádu sekund [20].

Zařízení je vybaveno malou levnou kamerou SQ19 od neznámého čínského výrobce. Manuál této kamery uvádí, že lze pořizovat video v rozlišení 1080p nebo 720p a fotky s rozlišením 1080p. Kamera má dále mód detekce pohybu a mód nočního vidění s infračerveným podsvícením. Video a fotky jsou ukládány na microSD kartu o maximální velikosti 32 GB, kamera tedy pracuje jako samostatné zařízení. K jejímu ovládní slouží dvě tlačítka (Power a Mode). Součástí je také akumulátor o kapacitě 200 mAh, který by měl zajistit nahrávání po dobu 100 minut. Kameru lze připojit do PC přes USB a vyčítat z ní data i nabíjet akumulátor.



Obrázek 3.3: GPS přijímač NEO-6M (vlevo), kamera SQ19 (vpravo)

INA219 od firmy Texas Instruments je jednobanálový senzor elektrického proudu. Princip funkce spočívá v měření úbytku napětí na externím proudovém bočníku, v tomto případě o odporu $10\text{ m}\Omega$. Senzor tak umožňuje monitorovat celkový aktuálně využívaný proud spolu s napětím akumulátoru až do 26 V. Napájení senzoru je v rozmezí od 3 V do 5.5 V a komunikace probíhá po sběrnici I²C. Senzor má dva vstupní piny, které umožňují změnit jeho adresu na sběrnici [21].

Za inerciální měřicí jednotku (IMU) se dá považovat InvenSense MPU-9250. Obsahuje tříosý gyroskop s programovatelnými rozsahy (± 50 , ± 500 , ± 1000 , $\pm 2000^\circ$ za sekundu), tříosý akcelerometr s programovatelnými rozsahy ($\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$) a tříosý magnetometr s rozsahem $\pm 4800\ \mu\text{T}$. Každá osa je vybavena 16-bitovým A/D převodníkem, nicméně magnetometr využívá jen 14 bitů. Všechny tři systémy jsou založeny na technologii MEMS (Mikroelektro-mechanické systémy), akcelerometr a gyroskop měří změnu odporu při deformaci, zatímco magnetometr využívá princip Hallova jevu. Rozsah napájecího napětí senzoru je od 2.4 V do 3.6 V a pro komunikační rozhraní jsou na výběr sběrnice I²C a SPI [22].

Alternativní způsob pro hrubé měření nadmořské výšky v případě výpadku GPS je barometr Bosch BMP280. S rozsahem 300-1100 hPa a přesností ± 1 hPa umožňuje odhadnout nadmořskou výšku do 9 km. Měření funguje na principu piezorezistivního MEMS. Napájení je možné od 1.7 V do 3.6 V a pro komunikaci lze opět zvolit I²C a SPI [23].

Pro měření parametrů atmosféry byly vybrány tyto senzory: digitální teploměr a vlhkoměr Sensirion SHT20, měřič znečištění ovzduší ams CCS811 a detektor intenzity UV záření Vishay VEML6070. SHT20 pracuje v rozsahu teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s maximální nepřesností $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Relativní vlhkost měří kapacitně v rozsahu 0 - 100 % s maximální nepřesností $\pm 7\%$. Zmíněné nepřesnosti jsou na většině rozsahu daleko nižší. Rozsah pracovního napětí je 2.1 V - 3.6 V [24]. CCS811 měří TVOC (Total Volatile Organic Compounds) v rozsahu 0 - 1187ppb a přepočítává je na ekvivalent CO_2 v rozsahu 400ppm - 8192ppm. Senzor pracuje od 1.8 V do 3.3 V [25]. VEML6070 měří bezrozměrnou intenzitu UVA záření (největší senzitivita na vlnové délce 355 nm), kterou lze přepočítat na UV index. Umožňuje nastavit integrační čas, a tím i rozlišení. Pracovní napětí je v rozsahu 2.7 V až 5.5V [26]. Všechny tři senzory komunikují přes sběrnici I²C. Pro monitorování teploty byly navíc vybrány čtyři NTC termistory s odporem 10 k Ω při 25 $^{\circ}\text{C}$, z toho tři SMD pro sledování teplot na plošném spoji a jeden externí termistor. Spolu s 10 k Ω rezistory tvoří napěťové děliče, které jsou měřeny analogovými vstupy OBC.

■ Napájení

Zdrojem energie je jednočlánekový lithiový akumulátor (nominální napětí 3.7 V) o kapacitě 8 Ah a rozměrech 90x60x12 mm. Váhou 135 g je dominantní položkou hmotnosti celého zařízení. V případě potřeby snížení hmotnosti je možné použít obdobné akumulátory s nižší kapacitou, což ale povede ke zkrácení provozní doby. Pro stabilizování pracovního napětí jsou určeny dva lineární regulátory s výstupním napětím 3.3 V, maximálním výstupním proudem 800 mA a napěťovým poklesem 100 mV při odběru 300 mA. Jeden regulátor je vyhrazen pro payload, druhý pro zbytek zařízení. Regulátory mají vestavěný obvod pro zapnutí/vypnutí výstupu, lze tak dálkově nebo programově ovládat napájení payloadu.

■ Ostatní

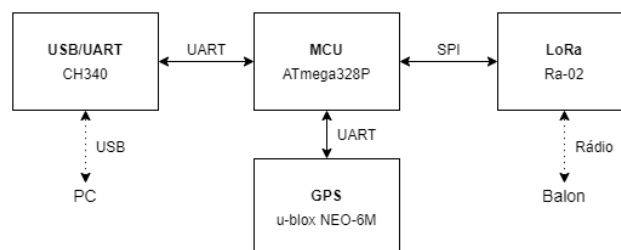
Paměťovým médiem je Micro SD karta, kterou lze jednoduše vyjmout z patice a vložit do PC. Komunikace probíhá po sběrnici SPI při pracovním napětí mezi 2.7 V a 3.6 V. Pro ukládání parametrů řídicího programu byla přidána externí EEPROM paměť komunikující přes I²C, kterou bude v případě poruchy jednodušší vyměnit, než měnit mikrokontrolér. Pro komunikaci pozemní stanice s počítačem je využit převodník CH340G, který konvertuje UART na virtuální sériovou linku po USB.

3.2 Návrh desek plošných spojů

Pro vytvoření schématických zapojení i následnou tvorbu podkladů pro výrobu plošných spojů byl využit volně šířený nástroj EasyEDA[27]. Tento program je možné používat jako počítačovou aplikaci, ale i jako vestavěnou online aplikaci v internetovém prohlížeči. EasyEDA spolupracuje s firmami JLCPCB a LCSC, což jsou čínské firmy, které vyrábí plošné spoje na zakázku a prodávají elektronické součástky. Po nakreslení plošného spoje umožňuje aplikace jednoduše objednat výrobu i součástky.

3.2.1 Plošný spoj pro pozemní stanici

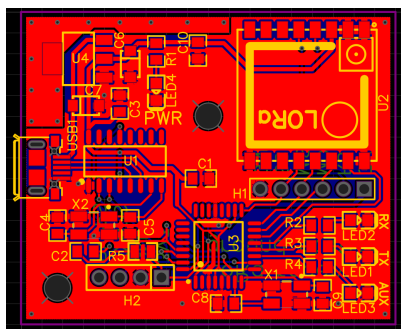
Pozemní stanice je v podstatě převodník mezi rádiovým vysílačem/přijímačem a USB sběrnici. Skládá se ze čtyř hlavních komponent: mikrokontrolér ATmega328P-AU, rádio Ra-02, GPS modul NEO-6M a převodník CH340G. Tyto komponenty jsou navzájem propojeny dle blokového schématu na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Blokové schéma pozemní stanice

Podle rozsahu pracovního napětí modulu Ra-02 byla zvolena úroveň logického napětí celé desky 3.3 V. Jelikož je rozhraním pozemní stanice sběrnice USB, která poskytuje napětí 5 V, byl jako zdroj napětí vybrán lineární stabilizátor LM1117S-3.3, opatřen na vstupu a výstupu tantalovými filtračními kondenzátory o kapacitě 10 μF . Každá komponenta je opatřena lokálním blokovacím kondenzátorem. Mikrokontrolér je taktován externím krystalem na frekvenci 8 MHz. Tato frekvence byla vybrána dle datasheetu (katalogový list) a odpovídá zvolenému pracovnímu napětí. Převodník CH340G je taktován externím krystalem s frekvencí 12 MHz a je přímo napojen na Micro USB konektor. Na desku byly umístěny čtyři LED diody - jedna indikuje přítomnost napájení a zbylé tři jsou ovládané mikrokontrolérem (dvě indikují příchozí a odchozí rádiovou komunikaci, jedna je rezervována pro testování/pozdější účel). Pro prvotní naprogramování mikrokontroléru je deska opatřena ISP

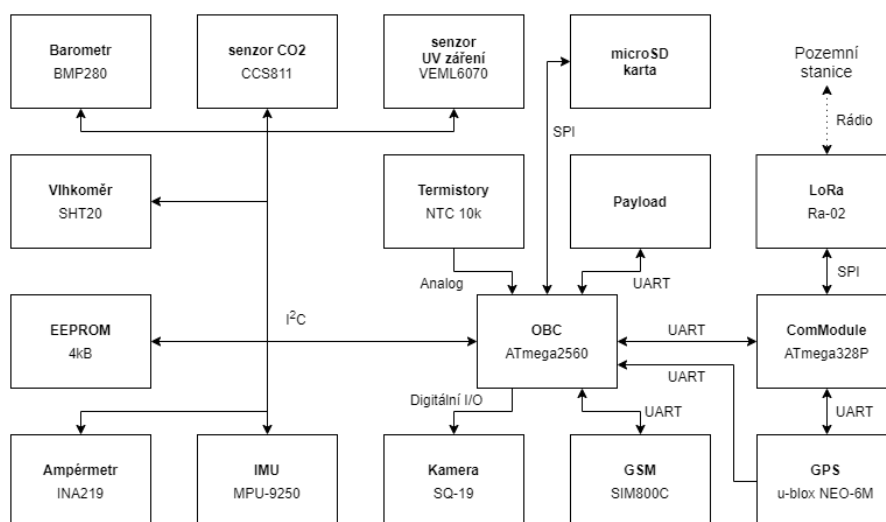
(In-system programming) konektorem. GPS modul je k desce připojen čtyřpinovým zámkovým konektorem XH2.54, aby mohl být v případě nepoužívání odpojen. Podrobné schéma zapojení všech součástí je uvedeno v příloze. Podle tohoto schématu byl následně nakreslen dvouvrstvý plošný spoj (obr. 3.5). Část rozlité mědi byla využita jako chladič plocha stabilizátoru.



Obrázek 3.5: Nákres plošného spoje pozemní stanice

3.2.2 Plošný spoj řídicí elektroniky balónu

Řídicí elektronika se skládá z mnoha komponent: OBC ATmega2560, všechny výše uvedené senzory, komunikační modul řízený mikrokontrolérem ATmega328P, GSM modul, ovládání kamery, Micro SD karta. Tyto komponenty jsou navzájem propojeny dle blokového schématu na obrázku 3.6 sběrnici I²C, několika sériovými linkami, popřípadě sběrnici SPI nebo jen vstupně/výstupními piny.



Obrázek 3.6: Blokové schéma elektroniky balónu

Stejně jako u předchozí desky byla i v tomto případě vybrána úroveň logického napětí 3.3 V dle parametrů většiny komponent. Deska je napájena lithiovým akumulátorem, jehož napětí leží v rozsahu 3 V až 4.2 V, podle stavu nabití. K zajištění požadovaného napětí jsou využity dva stabilizátory s nízkým úbytkem napětí - jeden pro napájení této desky a druhý dedikovaný pro payload. Vstupy a výstupy obou stabilizátorů jsou opatřeny tantalovými filtračními kondenzátory s kapacitou 10 μF . Aktivační pin stabilizátoru určeného pro payload je připojen k OBC. Výjimku napájení tvoří GSM modul a kamera, které jsou připojeny přímo na napětí akumulátoru za proudovým bočníkem. Tento bočník s odporem 10 $m\Omega$ je připojen na senzor proudu INA219. Všechny integrované obvody použité na desce jsou opatřeny lokálními blokovacími kondenzátory. Jelikož GSM modul pracuje na jiném napětí než zbytek zařízení, musely být jeho výstupy opatřeny odporovými děliči napětí. Sériová linka mezi OBC a payloadem byla opatřena diodami, které brání toku proudu do payloadu v případě vypnutí jeho stabilizátoru.

Kvůli pracovnímu napětí jsou oba mikrokontroléry taktovány frekvencí 8 MHz pomocí externích krystalů. Pro prvotní naprogramování mají každý vlastní ISP konektor a pro následné programování po sériové lince jsou vyvedeny jejich UART sběrnice spolu s resetovacím obvodem na programovací konektory. Tyto sběrnice UART jsou však zároveň využívány ke komunikaci mezi mikrokontroléry. Pro jejich využití k programování tedy musí být vždy na straně neprogramovaného procesoru uvedeny do stavu vysoké impedance. Za tímto účelem jsou na desce dvě tlačítka a diody, které programově ošetřují zmíněný problém. V případě stisku tlačítka jednoho čipu se zastaví vykonávaný program, sběrnice piny se nastaví do stavu vysoké impedance a rozsvítí se indikační dioda. Poté lze programovat druhý čip. Po ukončení této činnosti lze opět stisknout příslušné tlačítko a běh programu je obnoven.

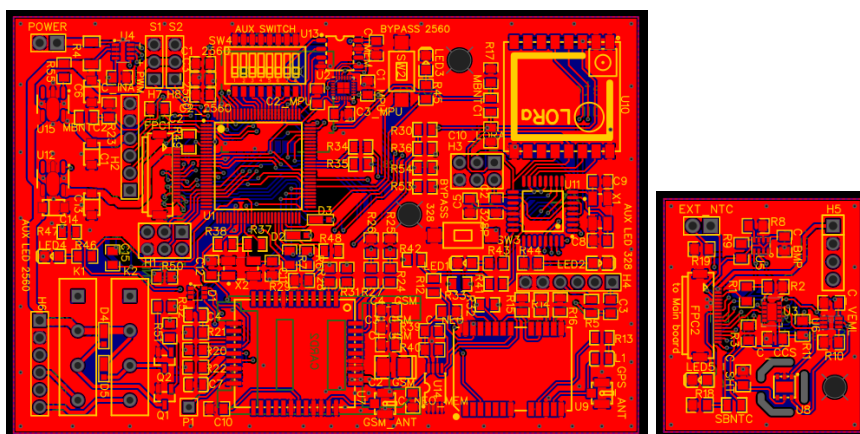
Na desku byl přidán osmikanálový DIP přepínač pro manuální nastavení programových parametrů před startem elektroniky. Pro případné využití servomotorů (například ovládní vypuštění plynu balónu, zpožděné vypuštění padáku) byla deska opatřena dvěma třipinovými konektory, které zajišťují napájení motorů i řídicí PWM signál. K ovládní kamery slouží dvě tlačítka, která byla nahrazena jazýčkovými relé. Tato relé jsou spínána pomocí tranzistorů a jsou opatřena ochrannými diodami, které brání průtoku indukovaného proudu při jejich rozepnutí.

Podrobné schéma zapojení všech součástek balónové elektroniky je uvedeno v příloze. Podle tohoto schématu byl následně nakreslen dvouvrstvý plošný spoj (obrázek 3.7). Většina komponent musí být ukryta v tepelné izolaci, nicméně některé senzory musí mít kontakt s atmosférou aby mohly řádně pracovat. Z tohoto důvodu byla elektronika rozdělena na dvě desky plošných spojů (hlavní deska a senzorická deska), které jsou navzájem spojeny plochým kabelem typu FFC (Flexible flat cable).

Na senzoricou desku byly umístěny: barometr BMP280, vlhkoměr SHT20, měřič UV záření VEML6070, senzor znečištění ovzduší CCS811, SMD termistor, konektor pro externí termistor a konektor pro připojení payloadu, který bude pravděpodobně také umístěn mimo hlavní stínění. Dle datasheetu byly okolo senzoru SHT20 vytvořeny výřezy v plošném spoji k minimalizaci vedení tepla od ostatních obvodů. K adresním pinům všech obvodů na senzoricke desce byly umístěny propojky, aby bylo možné v případě potřeby jednotlivé adresy změnit.

Zbylé komponenty byly umístěny na hlavní desku, která je uvnitř tepelného stínění. Rozměry desky odpovídají rozměrům akumulátoru (90 x 60mm). Na její spodní straně se nachází slot pro Micro SD kartu a slot pro SIM kartu. Adresní piny integrovaných obvodů komunikujících pomocí sběrnice I²C byly připojeny do OBC, aby mohly být programově nastaveny. Na sběrnice UART mezi GPS modul a mikrokontroléry byly umístěny propojky pro případ potřeby přerušování těchto spojů. Stejně bylo učiněno i v případě sběrnice UART mezi samotnými mikrokontroléry. Pro připojení GPS a GSM antén jsou využity konektory IPX.

Součástky napájecího modulu (konektor pro akumulátor, senzor proudu s bočníkem, stabilizátory, konektory pro servomotory) jsou umístěny pohromadě, aby nedocházelo k tokům velkých proudů celou deskou. Tato oblast je řádně ošetřena prokovenými otvory k lepšímu vedení tepla po obou stranách desky. Zároveň je zde umístěn jeden z termistorů ke sledování teploty tohoto modulu. Druhý termistor je umístěn dále, aby monitoroval celkovou teplotu uvnitř tepelného stínění a nebyl tolik ovlivněn napájecím modulem.



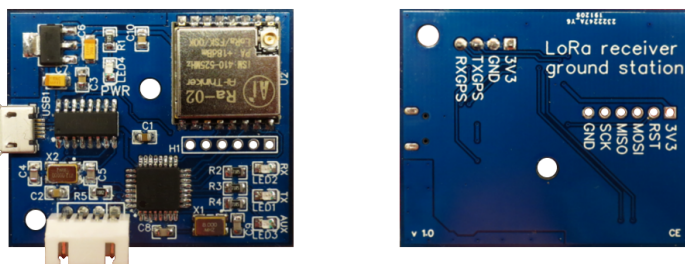
Obrázek 3.7: Nákrasy plošných spojů hlavní desky (vlevo) a senzoricke desky (vpravo)

3.2.3 Osazení a oprava chyb v návrhu

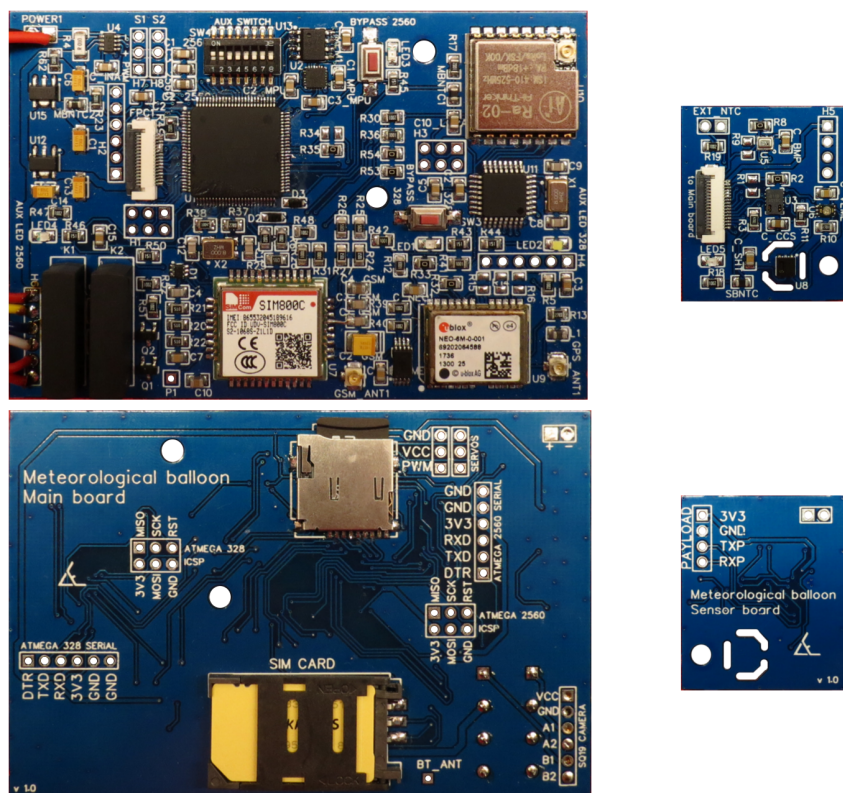
Po obdržení plošných spojů a součástek bylo provedeno jejich osazení ve Strojovně ČVUT, Karlovo náměstí, Praha. Spolu s plošnými spoji byla objednána i plechová šablona s výřezy k nanesení pájecí pasty na desky. Po aplikaci pasty byly jednotlivé komponenty přeneseny na jejich pozice a následně byla pájecí pasta přetavena pomocí horkovzdušné stanice do vodivého spojení. Některé integrované obvody musely být kvůli spojeným kontaktům odpájeny, očištěny a znovu připájeny. Po osazení všech součástek byly desky omyty lihem od zbytků pájecího tavidla.

Z kamerového modulu byl odstraněn plastový kryt, akumulátor a infračervené přisvětlení. Ovládací tlačítka byla nahrazena vodiči a spolu s napájením kamery byly tyto vodiče připojeny k hlavní desce balónové elektroniky. Také byl k hlavní desce připájen kabel se zámkovým konektorem pro připojení akumulátoru.

Před prvním vpuštěním elektrického proudu byly všechny desky řádně proměřeny, aby se zabránilo zkratu, který by mohl poškodit součástky. Následně byly pomocí ISP nahrány tzv. bootloadery, které umožňují další programování přes sériovou linku. V případě desky pozemní stanice byla odhalena návrhová chyba v nepřesném souběžném zapojení reset pinu ISP a resetovacího obvodu pro UART programování. Tento problém byl vyřešen dočasným zkratováním kondenzátoru a bootloader byl úspěšně nahrán. Poté byly postupně nahrávány jednoduché programy k otestování funkce všech komponent. Většina obvodů fungovala dle předpokladu, nicméně v případě GSM modulu SIM800C byl při návrhu opomenut pin s názvem "PWRKEY", sloužící k aktivaci zařízení. Po spojení tohoto pinu se zemí již modul fungoval. Při testování DIP přepínačů byly odhaleny studené spoje některých vývodů OBC, a tak byly pro jistotu všechny piny tohoto čipu znovu zapájeny. Poslední drobná chyba se objevila při testování vlhkoměru SHT20, a to kolize adresy na sběrnici I²C s obvodem pro měření proudu INA219. Tento problém bylo naštěstí možné ošetřit softwarově.



Obrázek 3.8: Osazený plošný spoj pozemní stanice, horní (vlevo) a spodní strana (vpravo)



Obrázek 3.9: Osazené plošné spoje, hlavní deska (vlevo), senzorická deska (vpravo), přední (nahore) a zadní strany (dole)

3.3 Ochranné pouzdro

Pro pozemní stanici byl nakreslen a následně vytisknut na 3D tiskárně ochranný kryt, aby při jejím používání nedošlo k mechanickému poškození drobných součástek. Kryt je vyroben z plastu a skládá se z horní a spodní části, které jsou navzájem spojeny dvěma šrouby se zapuštěnými maticemi. Po stranách jsou otvory pro konektory a na vrchní části jsou čtyři otvory určené LED diodám. Konektor modulu Ra-02 je umístěn mimo kryt, aby mohla být jednoduše provedena výměna antény v případě potřeby.



Obrázek 3.10: Kryt pozemní stanice

Balónová elektronika musí být ochráněna jak proti povětrnostním podmínkám, tak i proti mírnému nárazu při návratu na zem. Další velmi potřebnou částí je uchycení k padákovému a balónovému lanu. Za těmito účely byl vytvořen kryt složený z vnitřní a vnější části.

Vnitřní část krytu je tvořena plastovou krabičkou vytištěnou na 3D tiskárně. Spodní část krabičky je určena k uchování akumulátoru, na kterém je položena hlavní deska plošného spoje. Mezi akumulátorem a deskou je plastová pěnová fólie, aby bylo zamezeno případnému mechanickému poškození akumulátoru vpichem nebo oděrem součástek na desce. Přední strana krabičky je upravena tak, aby do ní bylo možné vložit plošný spoj kamery s objektivem umístěným mimo krabičku. Po stranách ve spodní části z krabičky vybíhají dvě podpory určené anténám pro rádio a GSM modul. Pro vodiče těchto antén a také GPS antény jsou v horní části umístěny malé výřezy. V rozích krabičky jsou zespodu zapuštěny matice určené k připevnění jejího víka.

Ve víku jsou uchycena čtyři závěsná očka pro spojení s balónem. Po obvodu spodní strany víka je umístěn rámeček, který zajišťuje přesné zasazení do krabičky a utěsňuje její postranní otvory. Mezi hlavní deskou a víkem je opět vrstva pěnové fólie určená k zateplení i ochraně součástek proti mechanickému poškození. Ve víku je otvor, kterým prochází plochý kabel spojující hlavní a sensorickou desku. Ta je připevněna oboustrannou lepící páskou k víku.



Obrázek 3.11: Vnitřní kryt balónové elektroniky (pozn.: víko bez otvoru pro plochý kabel)

Vnější část krytu je tvořena boxem slepeným z polystyrenu s odnímatelným víkem. Polystyren je tvarovaný tak, aby do něj bylo možné těsně zasunout plastovou krabičku s elektronikou. Obsahuje výřezy pro kameru i podpěry antén. Víko boxu obsahuje výřezy k prostrčení závěsných oček a také výřez pro senzorickou desku, která by měla mít kontakt s atmosférou, aby byla její měření alespoň částečně validní. Otvor pro kameru je překryt průhlednou fólií. Podobně je tomu i v případě otvoru pro senzorickou desku, tato fólie však obsahuje dva otvory. Na anténních podporách jsou přilepeny plastové fólie, a na nich samotné antény. Fólie slouží k ochraně antén před poškozením ohybem. Vodiče antén jsou k podporám připevněny stahovacími pásky. Celý box je pokryt izotermickou fólií (polyethylenová fólie s tenkou vrstvou hliníku), která odráží zpět vyzářené teplo. V rozích boxu je izotermická fólie spojena kaptonovou páskou. Na víku je přilepena GPS anténa oboustrannou páskou tak, aby normálový vektor její aktivní plochy směřoval k satelitům. V jednom z otvorů pro anténní podpory je umístěna externí termistorová sonda. Umístění payloadu je předpokládáno vedle senzorické desky, konkrétní rozměry ale zatím nejsou známy. Proto bude muset být v budoucnu víko boxu upraveno. Vnější rozměry boxu jsou 143x91x57 mm bez antén.



Obrázek 3.12: Vnější kryt balónové elektroniky

Kapitola 4

Programové vybavení

Pro řízení veškeré elektroniky bylo nutné napsat programy do všech použitých mikrokontrolérů. Ke zjednodušení práce byl využit volně šířený projekt Arduino [28], který kromě mnoha užitečných funkcí obsahuje také bootloader umožňující nahrávání programu po sériové lince. Programy jsou psány v jazyce C/C++. Pro tuto platformu také existuje mnoho volně dostupných knihoven k obsluze připojených zařízení. Některé z nich jsou využity a popsány dále v textu. Počítačová aplikace pro zpracování dat příchozích po sběrnici USB byla napsána v jazyce Java. Její grafické uživatelské rozhraní bylo vytvořeno s pomocí sady nástrojů Swing.

4.1 Program pozemní stanice

Činnost pozemní stanice spočívá v převodu mezi rádiovou komunikací a sériovou linkou. K modulu Ra-02 je přístupováno za pomoci knihovny Arduino LoRa [29] přes sběrnici SPI a výstup přerušení. Knihovna umožňuje jednoduše přiřadit rutinu obsluhující programové přerušování (ISR) vyvolané příchozí komunikací i proceduru pro odesílání dat. Modul ani knihovna samy o sobě neimplementují žádný adresovací protokol jednotlivých zařízení na stejné frekvenci, všechna zařízení čtou všechna data. Pro adresování byl tedy využit následující jednoduchý protokol převzatý z ukázkového kódu knihovny od T. Igoe. První dva bajty paketu jsou cílová adresa, následují dva bajty adresy odesílatele, poté je odeslán jednobajtový index paketu sloužící k detekci ztracených paketů, další bajt udává počet znaků přenášených dat a na konci

4.2 Programy balónové elektroniky

V balónové elektronice jsou dva mikrokontroléry. ATmega328P pro řízení komunikačního modulu a ATmega2560 jako OBC. Pro oba dva byly vytvořeny programy tak, aby mikrokontroléry spolupracovaly. Jejich komunikace probíhá přes sériovou linku. Ta je ovšem využívána i pro nahrávání programů, a tak musí být spojení řádně ošetřeno proti kolizi.

4.2.1 Program komunikačního modulu

Činnost komunikačního modulu se velmi podobá činnosti pozemní stanice. Opět je využita hardwarová sériová linka pro komunikaci (tentokrát je však místo USB převodníku napojena na OBC), SPI sběrnice s připojeným rádiem Ra-02 a knihovna SoftwareSerial komunikuje s GPS modulem. Příchozí rádiová komunikace je přesměrována na sériovou linku mimo případ, kdy je prvním znakem hvězdička (*). Ta značí příkaz určený komunikačnímu modulu, který je vykonán viz tabulka 4.2 a není přeposlán sériovou linkou dále do OBC. V případě, že jsou vyčtena nová poziční data a zároveň uplynula definovaná perioda (v současnosti je to 30 s), je rádiem odeslána zpráva začínající tagem, "GL"(GPS Location) a za ním následují zeměpisná šířka, délka a nadmořská výška v metrech (oddělené čárkami). Příchozí data po hardwarové sériové lince jsou automaticky přeposlána rádiem na pozemní stanici. Výjimkou je příkaz tvořený znakem "P" a znakem nového řádku, který je periodicky odeslán z OBC a informuje tak komunikační modul o činnosti. Pokud není tento příkaz přijat po definovanou dobu (60 s), je to interpretováno jako porucha programu OBC a komunikační modul jej restartuje. Tato funkce se nazývá watchdog a může být deaktivována příslušným příkazem.

Příkaz	Význam
*Lxx	nastavit lokální adresu (xx hexadecimálně), impl. 1A
*Dxx	nastavit adresu destinace (xx hexadecimálně), impl. 1B
*Bx	povolit tlačítko přemostění (x: 0 nebo 1), impl. 1
*Wx	povolit watchdog (x: 0 nebo 1), impl. 1
*R	resetovat OBC
*S	odeslat stavové informace

Tabulka 4.2: Seznam příkazů a jejich parametrů pro komunikační modul

Součástí programu je také ošetření tlačítka přemostění sériové linky (tzv. bypass tlačítka). V případě detekce stisku tlačítka jsou piny hardwarové sériové

Následuje hlavní programová smyčka, jejíž perioda je uměle držena kolem jedné sekundy. Na začátku je uložen čas od spuštění zařízení v milisekundách na Micro SD kartu. Poté je zkontrolováno bypass tlačítko, které při stisku, stejně jako v případě komunikačního modulu, pozastaví program a uvede piny sériové linky UART0 do stavu vysoké impedance a rozsvítí signalizační LED diodu. Po dalším stisku tlačítka je sériová linka opět inicializována, signalizační LED zhasne a program pokračuje dále. Následně jsou ošetřena příchozí data na sériových linkách. Data z GPS modulu jsou dekodována a v případě, že je detekována nová pozice, je uložena na Micro SD kartu. Data z payloadu jsou zapsána na Micro SD kartu a pokud je to povoleno, jsou i odeslána komunikačnímu modulu. Příchozí data z komunikačního modulu jsou také uložena na kartu a pokud začínají vykřičníkem (!), jsou brána jako příkaz a následně vykonána viz tabulka 4.3. Většina příkazů slouží pro vyčtení aktuálních měření z konkrétního senzoru, další pak obsluhují payload. Po vyřízení komunikace jsou na kartu ukládána data vyčítaná ze senzoru MPU9250 periodicky až do uplynutí 900 milisekund od začátku současné periody hlavní smyčky.

Následně je provedeno měření s pomocí stavového automatu, kdy v každé periodě hlavní smyčky je změřen jeden senzor tak, že hyperperioda měření je zhruba 10 sekund (celkem 10 stavů). Do těchto měření spadají všechny I²C senzory kromě MPU9250, dále probíhá měření síly GSM signálu, měření teplot pomocí NTC termistorů a vyfocení obrázku kamerou. Všechna měřená data kromě obrázku z kamery jsou uložena na Micro SD kartu. Kamera má své vlastní úložiště. Nakonec program inkrementuje svůj stav a zkontroluje odesílání SMS zprávy. Pokud uplynula definovaná perioda (v současnosti 30 minut) a GSM modul má odpovídající úroveň síly signálu, je odeslána SMS zpráva na specifikované telefonní číslo, která obsahuje informace o zeměpisné šířce a délce polohy, nadmořské výšce a napětí akumulátoru. Komunikace s GSM modulem probíhá pomocí standardizovaných AT příkazů.

Příkaz	Význam
!H	odeslat teplotu a vlhkost naměřené SHT20
!C	odeslat eCO2 a TVOC naměřené CCS811
!B	odeslat tlak, teplotu a nadmořskou výšku naměřené BMP280
!V	odeslat intenzitu UV naměřenou VEML6070
!I	odeslat proud a napětí baterie naměřené INA219
!T	odeslat teploty naměřené NTC termistory
!M	odeslat IMU data
!R	odeslat sílu GSM signálu
!G	odeslat GPS pozici
!Px	zapnout/vypnout napájení payloadu (x: 0 nebo 1), impl. 1
!X...	odeslat data do payloadu (všechny znaky následující za "!X")
!Yx	povolit odesílání dat payloadu (x: 0 nebo 1)

Tabulka 4.3: Seznam příkazů a jejich parametrů pro OBC

Data jsou na paměťovou kartu ukládána v určitém formátu, aby bylo jejich pozdější zpracování jednodušší. Každá zpráva je zapsána do souboru na nový řádek. To zajišťuje jednoznačné rozdělení informací. Většina zpráv začíná tagem složeným ze dvou písmen, viz tabulka 4.4. Veškerá příchozí data z komunikačního modulu jsou uložena s tagem "Received: ". Tagem nejsou označeny zprávy o událostech (např. chyba inicializace senzoru nebo odeslání SMS zprávy).

Tag	Význam
FT	čas aktuální periody od spuštění (ms)
AR	měření A/D převodníku termistorů
AT	teploty vypočtené z napětí termistorů
IM	hodnoty měřené MPU9250
SH	teplota a vlhkost SHT20
GT	čas GPS
GL	pozice GPS
C2	eCO2 a TVOC z CCS811
BM	teplota, tlak a nadmořská výška z BMP280
UV	intenzita UV z VEML6070
VC	napětí a proud z INA219
GS	síla signálu GSM
PL	příchozí data z payloadu

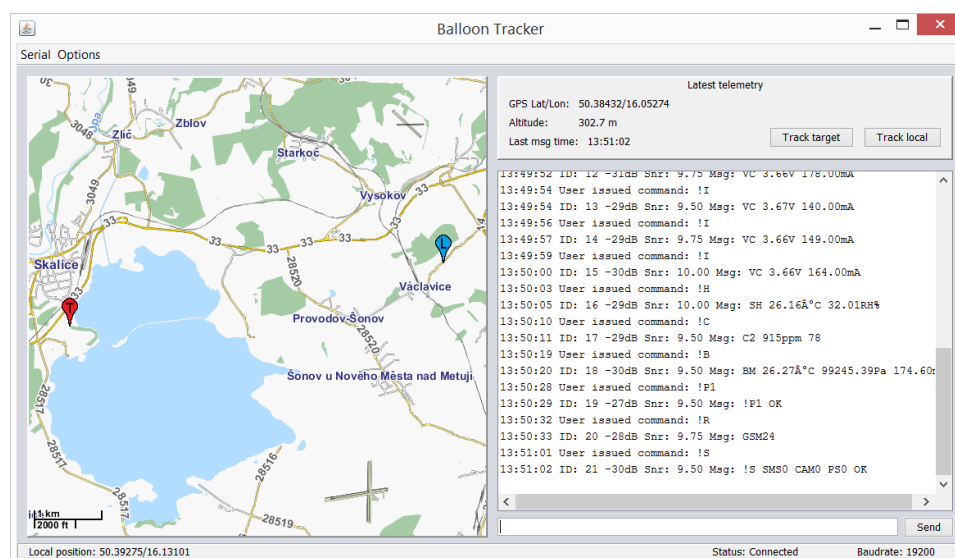
Tabulka 4.4: Seznam tagů a jejich významů v ukládaných datech

4.3 Počítačová aplikace pro monitorování letu

Operátor letu by měl být schopen sledovat pozici balónu v reálném čase. Představa je taková, že operátor bude vybaven přenosným počítačem s připojenou pozemní stanicí, a podle pohybu balónu bude upravovat svoji pozici (s využitím automobilu) tak, aby zajistil komunikaci na přímou viditelnost. K zobrazení přijímaných letových dat a jejich zaznamenávání slouží počítačová aplikace s grafickým uživatelským rozhraním.

V levé polovině okna aplikace je mapa zobrazující aktuální pozici operátora a poslední přijatou pozici balónu s využitím dvou ukazatelů s písmeny L (Local) a T (Target). V horní části pravé poloviny okna se nachází panel s informacemi o poslední přijaté poloze balónu a dvě tlačítka, pomocí kterých lze zapnout sledování pozice balónu nebo operátora (mapa se posouvá tak, že ukazatel je na středu). Ve spodní části pravé poloviny okna je umístěna sériová konzole, která zobrazuje příchozí komunikaci a také umožňuje odesílat textová data. Rozhraní má také horní a spodní lištu. Horní lišta obsahuje dvě rozbalovací menu s názvy "Serial" a "Options". V prvním menu lze vybrat

připojené zařízení přes sériovou linku ze seznamu všech automaticky detekovaných zařízení a také nastavit komunikační rychlost. Druhé menu obsahuje čtyři položky. První umožňuje vypnout/zapnout zobrazování ukazatelů, další dvě slouží k otevření internetového prohlížeče na stránce Google Maps s pozicí balónu, popřípadě s trasou z pozice operátora na pozici balónu. Poslední položka otevře okno nastavení, kde lze zvolit složku, ze které se načítají mapy, a také zvolit tagy příchozích zpráv o pozici balónu a operátora. Spodní lišta zobrazuje stavové informace. V levé části jsou zobrazeny GPS souřadnice operátora, pokud jsou známy. V pravé části se ukazuje, zdali je připojena pozemní stanice a na jakou rychlost je nastavena sériová komunikace.



Obrázek 4.1: Grafické uživatelské rozhraní aplikace monitorování letu

Jak již bylo zmíněno, program je napsán v jazyce Java, konkrétně s pomocí sady nástrojů Swing pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní. Pro vykreslování map byla použita knihovna Mapsforge [40], která nabízí dlaždici vložitelnou do Swing rozhraní. Tato dlaždice je plně funkční mapa, kterou lze nastavit na konkrétní pozici a také ji lze ovládat kurzorem (posuv, přiblížení). Dlaždice také umožňuje vykreslovat vlastní grafiku do vrchní vrstvy na určitou pozici v mapě, přes což jsou vytvořeny zmíněné ukazatele. Vektorové mapy, které knihovna vykresluje, jsou získány z projektu OpenStreetMap [41]. Tyto mapy jsou volně dostupné k použití v aplikacích třetích stran. Kromě online verze map existují i stažitelné mapy celého světa rozdělené do souborů podle zemí. Tyto soubory využívá aplikace, aby bylo možné sledovat pozici balónu i bez připojení k internetu. V případě, že je dostupné připojení k internetu, je možné využít tlačítka v menu "Options" a zobrazit ve webovém prohlížeči Google Mapy [42] s vyhledanou trasou z místa operátora na místo poblíž balónu.

Po spuštění programu je vytvořen soubor ve složce "logs" s názvem současného data a času. Do tohoto souboru je zapisována veškerá příchozí i odchozí komunikace spolu s časem události. Přístup k sériovým portům je zajištěn knihovnou jSerialComm [43]. Když uživatel klikne na menu "Serial", je získán aktuální seznam sériových linek připojených k počítači a dle něj jsou vygenerována tlačítka. Uživatel vybere jednu linku ze seznamu a program se na ní pokusí připojit. Pomocí timeru je každých 200 ms volána funkce, která zjišťuje stav vybrané sériové linky. V případě, že linka není připojena, je proveden pokus o připojení. V případě, že je linka připojena a je detekována příchozí komunikace, jsou všechna data vyčtena a vypsána do textového pole sériové konzole a zároveň do logovacího souboru. Pokud navíc příchozí data obsahují jeden ze zvolených tagů pro zprávy o pozici, je příslušná informace o pozici aktualizována a podle ní i ukazatel na mapě. Odchozí komunikace probíhá přes příkazový řádek po stisku tlačítka "Send". Program si pamatuje poslední odeslaný příkaz, který lze vyvolat stiskem klávesy šipka nahoru. Všechna zvolená nastavení jsou ukládána do souboru a po restartu programu znovu načtena, včetně názvu sériové linky. Program se tedy automaticky pokusí připojit s poslední známou konfigurací.

Pro pozdější zpracování dat uložených na Micro SD kartě z balónu byl vytvořen jednoduchý skript v jazyce Matlab, podobně jako v [14]. Tento skript pouze prochází uložený soubor a rozděljuje data řádek po řádku podle tagů do odpovídajících polí spolu s časem jejich zaznamenání. Takto rozdělená data lze pak jednoduše použít k vygenerování grafů.

Kapitola 5

Pozemní testování

Po mechanickém sestavení a prvotním naprogramování byla balónová elektronika podrobena mnoha testům programů, aby bylo nalezeno a odstraněno co největší množství chyb. Byly odzkoušeny a odladěny uvedené komunikační příkazy, všechny použité sběrnice i zapisování souborů na paměťovou kartu. Následně mohly být testovány samotné přístroje (senzory) a jejich měření.

Hned zpočátku byla objevena neopravitelná chyba softwaru kamery, která spočívá v limitaci maximálního počtu uložených snímků na 1000. Upravit software kamery nelze, jedinou možností je tedy upravit periodu pořizování snímků s ohledem na odhadovanou dobu letu.

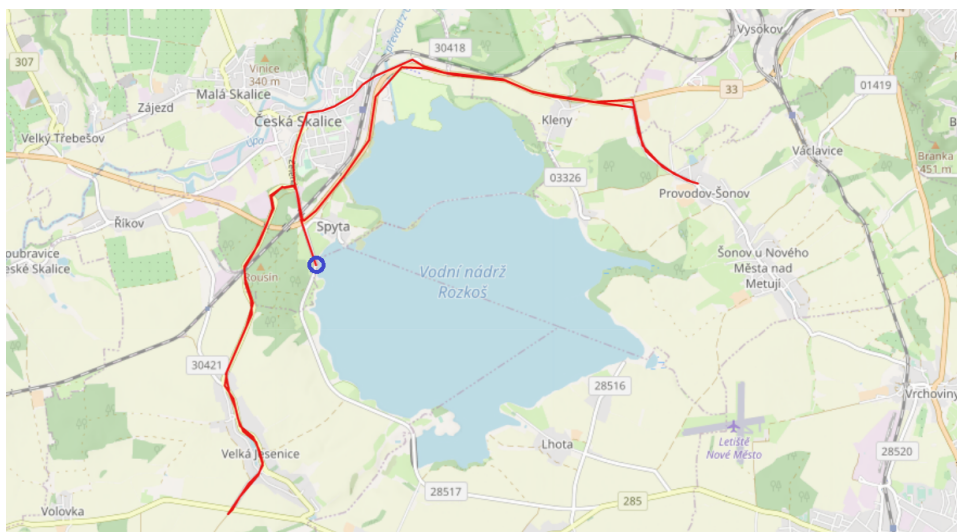
Z důvodu zatím neexistujícího payloadu byla sériová komunikace mezi ním a palubním počítačem ověřena pouze s pomocí převodníku a sériové konzole v počítači. Příkaz určený pro zapnutí a vypnutí napájení payloadu byl otestován digitálním multimetrem.

Pro otestování elektroniky v podmínkách alespoň částečně podobných těm při skutečném balónovém letu bylo provedeno několik experimentů. Prvním experimentem byl test rádiového spojení na větší vzdálenost. Druhý test se zabýval vlivem venkovní teploty na vnitřní teplotu a byl proveden v mrazícím boxu. Třetí test byl proveden s cílem zjistit výdrž akumulátoru a stabilitu programů při delší provozní době.

5.1 Test rádiového spojení

Za účelem ověření komunikace na velkou vzdálenost musela být vybrána lokace s přímou viditelností mezi balónovou elektronikou a pozemní stanicí. K tomu byla zvolena vodní nádrž Rozkoš (285 m n. m.) spolu s nedalekým vrchem Dobrošov (624 m n. m.). Elektronika byla dopravena automobilem na břeh vodní nádrže a pozemní stanice na zmíněný vrch. Rádiovým spojením byla bez problému přijímána GPS pozice na vzdálenost 10.5 kilometrů. Poté byla elektronika balónu přemístěna dále od břehu nádrže tak, že komunikační vzdálenost byla 12.5 kilometrů. V této konfiguraci byla data přijímána jen s velkými obtížemi, což ale mohlo být způsobeno možnými překážkami na trase signálu.

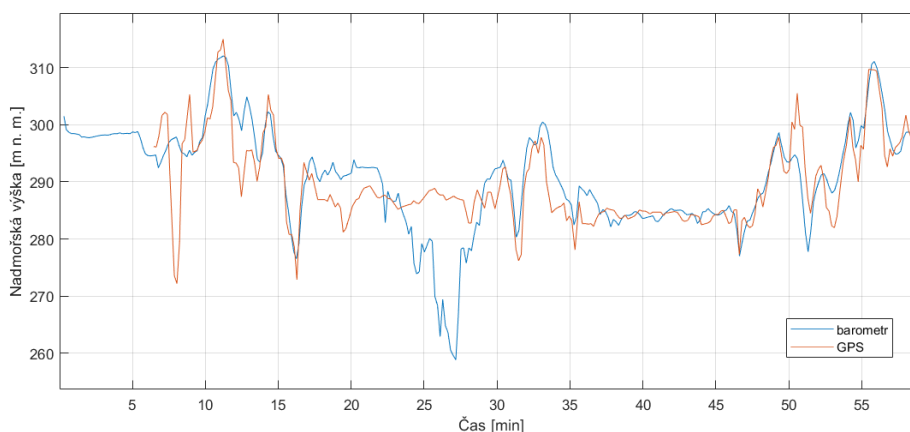
Pohyb elektroniky byl po celou dobu experimentu zaznamenáván a je znázorněn červenou čarou na obrázku 5.1. Modrou kružnicí je znázorněno místo na břehu vodní nádrže, ze kterého byla vyslána data přijatá pozemní stanicí. Při tomto experimentu bylo také za účelem otestování GSM modulu povoleno odesílání SMS zpráv. Zprávy jsou odesílány jednou za půl hodiny, shodou okolností byla zpráva odeslána z místa velmi blízko místu navázání spojení s pozemní stanicí (viz modrá kružnice na obrázku 5.1). Kromě zeměpisné šířky a délky obsahovala SMS zpráva také informace o nadmořské výšce 285.3 metrů a napětí akumulátoru 3.69 Voltů.



Obrázek 5.1: Trasa pohybu balónové elektroniky při experimentu (vytvořeno v GPSVisualizer.com)

Na obrázku 5.2 je provedeno srovnání měřené nadmořské výšky dvěma různými způsoby - barometrem a GPS. Křivka naměřených dat barometrem

byla posunuta o rozdíl mezi průměrnou hodnotou nadmořské výšky z GPS a průměrem barometrické výšky za celé měření, jelikož GPS lze brát jako absolutní, ale barometrická nadmořská výška je vztažena k aktuálnímu tlaku při hladině moře. Po této kalibraci jsou křivky velmi podobné, až na dva úseky. Prvních deset minut měření probíhala inicializace GPS, navíc bylo zařízení uvnitř budovy, GPS modul měl tedy slabší signál. Následoval transport zařízení v automobilu, při kterém byla měření obou přístrojů podobná. Výjimku tvoří úsek mezi 23. a 29. minutou, kdy bylo zařízení vyjmutο z automobilu za účelem navázání spojení s pozemní stanicí. V tu dobu foukal vítr, který mohl způsobit nárůst měřeného tlaku, a tím způsobený pokles vypočtené nadmořské výšky.



Obrázek 5.2: Nadmořská výška během experimentu měřená barometrem a GPS

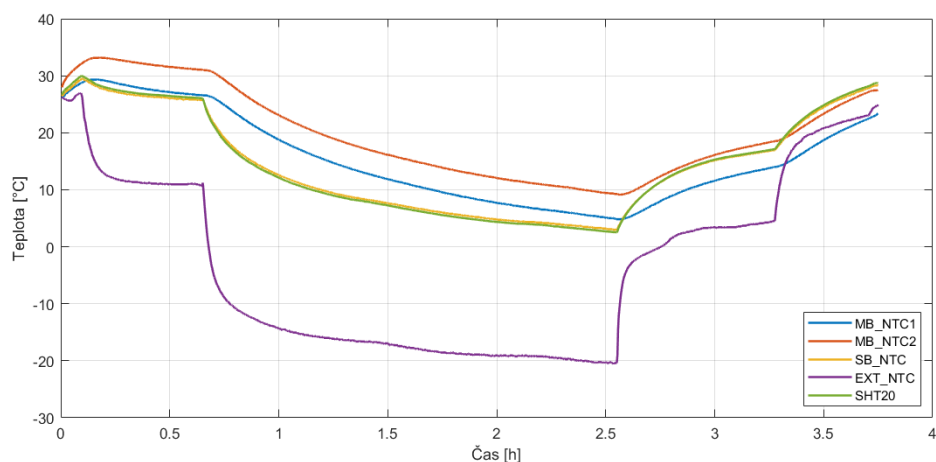
5.2 Teplotní test

Atmosférická teplota se během letu balónu výrazně mění. Z pozemní teploty cca 15 °C klesá na -50 °C až -80 °C v tropopauze (hranice mezi troposférou a stratosférou). Následně mírně vzroste na teplotu kolem -40 °C. Všechny tyto teploty jsou ovlivněny místem vypuštění balónu, ročním obdobím a denní dobou. U většiny použitých součástek výrobci v katalogových listech deklarují jejich spolehlivou funkčnost od -40 °C. Proto musí být na dobu přeletu tropopauzy zajištěna tepelná ochrana.

Obrázek 5.3 zachycuje měřené teploty v průběhu experimentu v mrazícím boxu. Křivky odpovídají jednotlivým termistorům (MB_NTC1 - termistor na středu hlavní desky, MB_NTC2 - termistor na hlavní desce poblíž napěťových stabilizátorů, SB_NTC - termistor na senzorické desce, EXT_NTC - externí termistor) a senzoru SHT20, který má udávanou přesnost $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ na celém rozsahu. Zařízení bylo uzavřeno do ochranného pouzdra (viz kapitola 3.3)

utěsněného kaptonovou páskou. Pro plynulejší přechod teplot bylo zařízení umístěno nejprve na cca půl hodiny do chladničky, následně na cca 1.8 h do mrazícího boxu a před ukončením experimentu opět do chladničky. Digitálním multimetrem byly změřeny teploty v chladničce $7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ a v mrazícím boxu $-19\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Křivka termistoru senzoričké desky kopíruje křivku digitálního teploměru SHT20, přepočtení teploty z napětí na odporovém děliči je tedy správný. Teplota mezi dvěma termistory hlavní desky se celou dobu liší zhruba o $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je pravděpodobně způsobeno konstantním ztrátovým výkonem na stabilizátorech. Venkovní teplota v mrazícím boxu se oproti vnitřní teplotě zařízení liší zhruba o $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, tepelná izolace se tedy zdá dostatečná pro použití při stratosférickém letu, nicméně by bylo vhodné provést další měření v tepelné komoře s adekvátními teplotami.



Obrázek 5.3: Průběhy měřených teplot během testu v mrazícím boxu

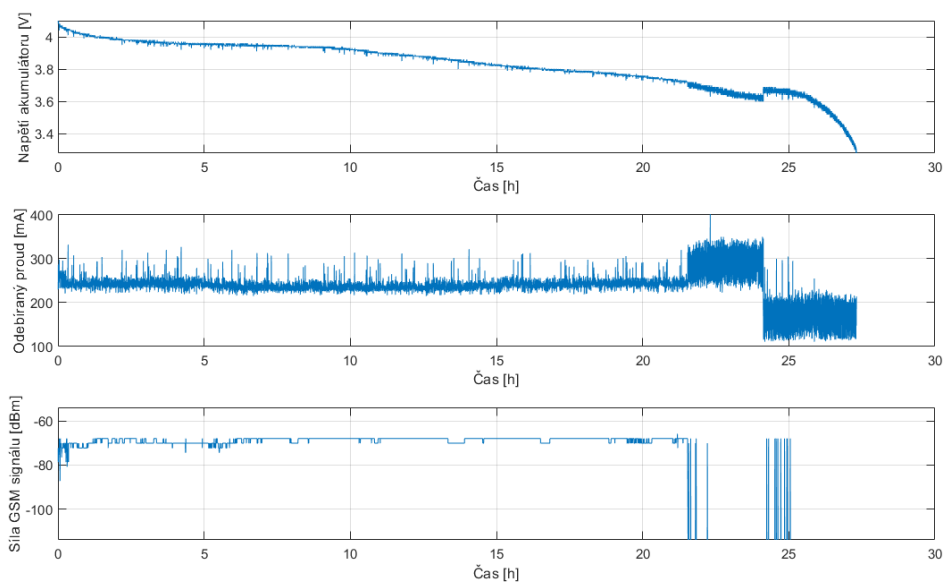
5.3 Test výdrže akumulátoru

Vybitý akumulátor s napětím 3.3 V byl nabit na napětí 4.2 V měřenou kapacitou 6.5 Ah . Krátce poté bylo zařízení spuštěno a umístěno na okno, kde bylo ponecháno následujících 27 hodin. Stav napětí akumulátoru byl průběžně kontrolován rádiovou komunikací, aby nedošlo k poškození akumulátoru podvybitím. Při poklesu na původní napětí 3.3 V byl experiment ukončen, nicméně většina subsystémů byla stále schopná pracovat.

Obrázek 5.4 ukazuje celkový průběh napětí akumulátoru, odebíraného proudu a měřenou sílu GSM signálu. Prvních 21 hodin probíhal test dle očekávání. Napětí akumulátoru postupně klesá s průměrným odebíraným

proudem 240 mA. Po celou tuto dobu všechny subsystémy fungovaly a programy obou procesorů běžely bezchybně. V 22. hodině došlo k poklesu napětí akumulátoru pod 3.7 V a v ten samý čas nastal problém v komunikaci s GSM modulem. Podle odebíraného proudu, který vzrostl na průměrně 290 mA, a jen zřídka příchozí komunikace o síle signálu bylo odhadováno, že se modul cyklicky restartuje. Tento odhad byl později potvrzen odpovídajícím měřením. Ve 25. hodině je možné pozorovat pokles odebíraného proudu na průměrných 170 mA, který nastal z důvodu programovaného vypnutí kamery při poklesu napětí akumulátoru na úroveň 3.6 V. Toto opatření mělo prodloužit výdrž akumulátoru s předpokladem, že balón již přistál zpět na zem a pořizování snímků dále není třeba. Na základě tohoto experimentu je možné zvýšit tuto hranici na cca 3.75 V.

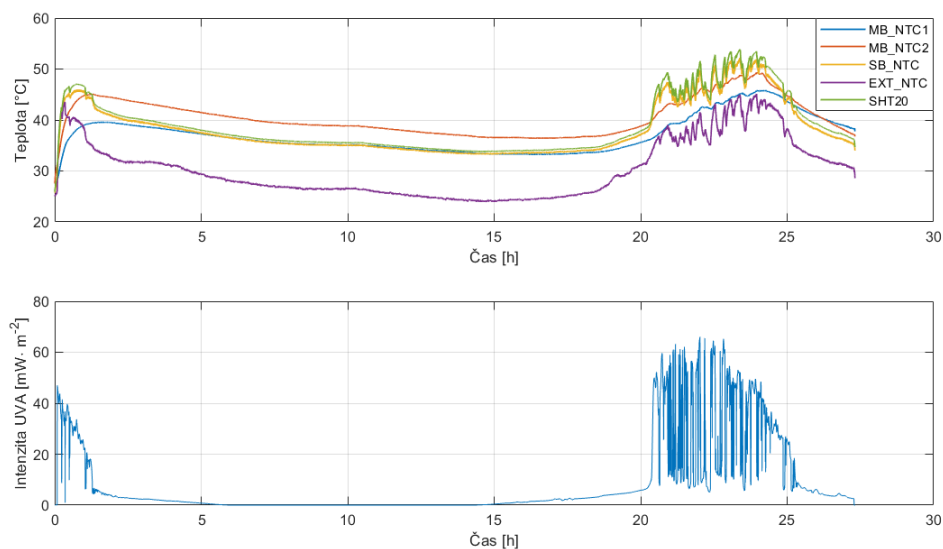
Porucha GSM modulu snižuje celkovou výdrž z 27 hodin na 21.5 hodiny. Vzhledem k výrobcem deklarované funkci modulu již od 3.4 V je tato porucha spíše způsobena nepřesným spouštěním modulu (viz kapitola 3.2.3), které vede k jeho cyklickému restartování. V experimentu není zahrnuta spotřeba případného payloadu. Vliv na celkovou výdrž bude mít i nízká teplota, které při tomto testu nebyla nikterak simulována.



Obrázek 5.4: Průběhy napětí a proudu z akumulátoru spolu s měřenou silou GSM signálu

Naměřené teploty během experimentu jsou značně ovlivněny slunečním svitem, jak ukazuje obrázek 5.5. Experiment započal ve 14:50, a tak bylo zařízení na okně vystaveno přímému slunečnímu svitu. Po přechodu do stínu a následně tmy pomalu teploty klesají, až do následujícího dne, kdy

s východem slunce opět pozvolna rostou. Ve 21. hodině je experiment opět vystaven přímému slunečnímu svitu, který způsobuje postupný nárůst vnitřní teploty až k 50 °C. Tato teplota se blíží hraniční pracovní teplotě některých součástek, nicméně při reálném balónovém letu bude okolní teplota podstatně nižší, přehřátí elektroniky tedy nehrozí.



Obrázek 5.5: Průběhy měřených teplot spolu s intenzitou UVA záření

Kapitola 6

Závěr

Stratosférické balónové lety zůstávají i nadále vhodnou variantou testování kosmických přístrojů před jejich nasazením do provozu. V budoucnu můžeme očekávat jejich využití i pro náhradu prvních stupňů menších raket sloužících k umístění zařízení na oběžnou dráhu Země.

V rámci této diplomové práce byla navržena, sestavena a naprogramována cenově dostupná gondola stratosférického balónu spolu s pozemní stanicí pro řízení letu. Její základní funkce byly úspěšně ověřeny při pozemních testech. Elektronika gondoly umožňuje připojení testovaného payloadu s komunikací přes sériovou linku. Tato komunikace je ukládána na paměťovou kartu, popřípadě odesílána rádiem. Pro napájení payloadu je dedikován stabilizátor s maximálním proudem 800 mA. Při vyšším požadavku na proud je třeba použít sekundární zdroj energie.

Prezentovaná balónová gondola najde využití pro testování mnoha zařízení, vytvořených na ČVUT, v podmínkách blízkého vesmíru, ať už jde o samotné senzory, nebo celé systémy (např. nanosatelity). Inovativním vědeckým experimentem pak může být sledování pozemních gama záblesků ze stratosféry s využitím rentgenového teleskopu s optikou typu račí oko.

Celkové náklady na vyvinuté zařízení jsou do 4000 Kč včetně pozemní stanice. Ve srovnání s podobným, komerčně dostupným řešením, je toto zařízení výrazně cenově efektivnější a navíc disponuje širokým spektrem senzorů [44]. Tabulka 6.1 popisuje rozložení hmotností a cen jednotlivých komponent gondoly. Výše uvedená částka neobsahuje cenu samotného pryžového balónu, plnicího plynu, padáku a letového povolení. Podle hmotnosti případného

payloadu (do 10 kg) a požadované nadmořské výšky (20 až 45 km) je třeba vybrat vhodnou kategorii balónu (viz tabulka 2.1), počínaje kategorií 600 g. Balónový let je tak možné uskutečnit od 15000 Kč [45]. Provedením letu nedochází k poškození gondoly, je možné ji používat opakovaně.

Díl	Hmotnost (g)	Cena (Kč)
Elektronika	40	2000
DPS	12	780
Akumulátor	136	275
Obal	77	300
Celkem	265	3355

Tabulka 6.1: Seznam hmotností a cen částí balónové gondoly



Přílohy



Příloha A

Literatura

- [1] Alvin L. Morris. *Scientific Ballooning Handbook*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1975.
- [2] Nobuyuki Yajima, Naoki Izutsu, Takeshi Imamura, Toyoo Abe. *Scientific Ballooning*. Springer, New York, 2014.
- [3] StratoCat. Sratoscope I. StratoCat, 27. 3. 2020. [Online] <https://stratocat.com.ar/fichas-e/1957/NBR-19570822a.htm>.
- [4] Jun Nishimura. Scientific ballooning in the 20th century; A historical perspective. *Advances in Space Research*, 30:1071–1085, 12 2002.
- [5] Ralph H. Upson. Stresses in a Partially Inflated Free Balloon - with Notes on Optimum Design and Performance for Stratosphere Exploration. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 6(4):153–156, 1939.
- [6] Yatish T. Shah. *Thermal Energy: Sources, Recovery, and Applications*, chapter 4.12.4. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
- [7] Michael Smith and Greg Allison. The return of the balloon as an aerospace test platform. In *International Balloon Technology Conference*, 06 1999.
- [8] Stephen Horan, Robert Hull, and Lawrence Alvarez. Using a balloon flight for end-to-end testing of a nanosatellite mission. *Journal of Small Satellites*, 1:9–18, 01 2012.
- [9] Mathias Tømmer, Roger Birkeland, Amund Gjersvik, Timo Stein, Frida Vestnes, Jon Skagmo, Knut Kvamtrø, Fabian Eckholdt, Torgeir Alstad, Jøran Grande, and Stian Mathisen. Testing of radio communication

- subsystems for the NUTS CubeSat on a meteorological balloon flight from Andøya in 2014. In *22nd ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, 09 2015.
- [10] Zero 2 Infinity. Bloostar - Launch Vehicle Payload User's Guide. Zero 2 Infinity S.L, 2018. [Online] <http://www.zero2infinity.space/wp-content/uploads/2018/01/Z2I-BS-TN-1-0316-R2-Bloostar-Payload-User-Guide.pdf>.
- [11] René Hudec, Ladislav Pína, and Adolf Inneman. Novel wide-field x-ray optics for space. In Georges Otrio, editor, *International Conference on Space Optics — ICSSO 2000*, volume 10569, pages 768 – 776. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017.
- [12] René Hudec, Ladislav Pína, Veronika Maršíková (Semencová), Ondřej Nentvich, Martin Urban, and A. Inneman. Lobster eye x-ray optics for astrophysics: Recent status. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 48, 07 2018.
- [13] U. Inan, Morris Cohen, R. Said, D. Smith, and L. Lopez. Terrestrial gamma ray flashes and lightning discharges. *Geophys. Res. Lett.*, 33:doi:10.1029/2006GL027085, 09 2006.
- [14] J. Horyna and M. Němec. Proposal for balloon experiment. Seminar work, Space Engineering Course, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague, 30. 12. 2018.
- [15] Atmel. ATmega2560. Microchip Technology Inc., 2014. [Online] <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560>.
- [16] Microchip. ATmega328P. Microchip Technology Inc., 2018. [Online] <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>.
- [17] Ai-Thinker. Ra-02. Ai-Thinker Technology Co., Ltd, 2017. [Online] http://wiki.ai-thinker.com/_media/lora/docs/c048ps01a1_ra-02_product_specification_v1.1.pdf.
- [18] Semtech. SX1278. Semtech Corporation, 2015. [Online] <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1278>.
- [19] SIMCom. SIM800C. SIMCom Wireless Solutions Ltd., 2015. [Online] <https://simcom.ee/modules/gsm-gprs/sim800c/>.
- [20] u-blox. NEO-6M. u-blox AG, 2011. [Online] https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf.
- [21] Texas Instruments. INA219. Texas Instruments Incorporated, 2015. [Online] <https://www.ti.com/product/INA219>.

- [22] InvenSense. MPU-9250. InvenSense Inc., 2016. [Online] <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>.
- [23] Bosch. BMP280. Bosch Sensortec GmbH, 2015. [Online] <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/pressure-sensors-bmp280-1.html>.
- [24] Sensirion. SHT20. Sensirion AG, 2014. [Online] <https://www.sensirion.com/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-temperature-sensor-sht2x-digital-i2c-accurate/>.
- [25] ams. CCS811. ams AG, 2016. [Online] https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf.
- [26] Vishay. VEML6070. Vishay Semiconductors, 2019. [Online] <https://www.vishay.com/docs/84277/veml6070.pdf>.
- [27] EasyEDA. EasyEDA software. EasyEDA, 2019. [Online] <https://easyeda.com/>.
- [28] Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, David Mellis. Arduino. Arduino AG, 2020. [Online] <https://www.arduino.cc/>.
- [29] Sandeep Mistry. Arduino LoRa library. GitHub, Inc., 2020. [Online] <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>.
- [30] Mikal Hart. TinyGPS. Arduinana, 2020. [Online] <http://arduiniana.org/libraries/tinygps/>.
- [31] Adafruit Industries. Adafruit_CCS811. GitHub, Inc., 2020. [Online] https://github.com/adafruit/Adafruit_CCS811.
- [32] Adafruit Industries. Adafruit_BMP280_Library. GitHub, Inc., 2020. [Online] https://github.com/adafruit/Adafruit_BMP280_Library.
- [33] Adafruit Industries. Adafruit_VEML6070. GitHub, Inc., 2020. [Online] https://github.com/adafruit/Adafruit_VEML6070.
- [34] Adafruit Industries. Adafruit_INA219. GitHub, Inc., 2020. [Online] https://github.com/adafruit/Adafruit_INA219.
- [35] μ Fire. uFire_SHT20. GitHub, Inc., 2020. [Online] https://github.com/u-fire/uFire_SHT20.
- [36] Bolder Flight Systems. MPU9250. GitHub, Inc., 2020. [Online] <https://github.com/bolderflight/MPU9250>.
- [37] Jack Christensen. Arduino External EEPROM Library. GitHub, Inc., 2020. [Online] <https://github.com/JChristensen/extEEPROM>.



Příloha B

Obsah přiloženého CD

- Složka models - modely krytů pro 3D tisk
- Složka programs – PC aplikace řízení letu
- Složka schemes – schémata zapojení plošných spojů
- Složka sources – zdrojové kódy řídicích programů
- Soubor dataVisualizer.m - Matlab skript pro zpracování logovaných dat
- Soubor thesis.pdf - tato práce