



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**PLATFORMA PRO MĚŘENÍ
ATMOSFÉRICKÝCH VELIČIN**

PLATFORM FOR MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC QUANTITIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ HANÁK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETER CHUDÝ, Ph.D. MBA

BRNO 2021

Zadání diplomové práce



24212

Student: **Hanák Jiří, Bc.**

Program: Informační technologie a umělá inteligence

Specializace: Vestavěné systémy

Název: **Platforma pro měření atmosférických veličin**
Platform for Measurement of Atmospheric Quantities

Kategorie: Vestavěné systémy

Zadání:

1. Seznamte se s problematikou měření atmosférických veličin.
2. Nastudujte současný stav dostupných platforem pro aerologické měření.
3. Navrhněte koncept vestavěného systému, který bude schopen provádět aerologická měření. Detailně popište jednotlivé části uvažovaného řešení.
4. S ohledem na technické parametry a dostupnost zvolte vhodné komponenty. Následně vytvořte desku plošných spojů a implementujte navrženou platformu na obvodové úrovni.
5. Proveďte a vyhodnoťte jednoduchý experiment pro ověření návrhu platformy.
6. Diskutujte možné směry a budoucí vývoj v rámci zkoumané disciplíny.

Literatura:

- Dle doporučení vedoucího práce.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1, 2 a 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Chudý Peter, doc. Ing., Ph.D. MBA**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2020

Datum odevzdání: 19. května 2021

Datum schválení: 15. března 2021

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací vestavěného systému pro aerologická měření. Účelem systému je monitorovat stav atmosférických veličin během stoupaní v závěsu pod meteorologickým balónem.

V první řadě je věnována pozornost zemské atmosféře a jejím veličinám, dále pak přehledu stávajících systémů pro provádění aerologických měření. Jádro práce je zaměřené na volbu měřících technik a výběru vhodných měřících prvků pro daný scénář. Aerologická sonda staví na snímačích atmosférických veličin H1H-8131-021-001, MS5611-01BA03 a PT1000-550 pro snímání teploty, přičemž GNSS data přijímá pomocí modulu MAX-M8Q-0 a naměřená data ukládá na microSD kartu a paralelně vysílá pomocí rádiového modulu MTX2-434.650-10. Řízení systému obstarává mikrokontrolér řady STM32L1 od firmy STMicroelectronics programovaný v jazyce C s využitím abstraktní vrstvy HAL.

Abstract

This work is dealing with the design and implementation of an embedded system for aerology measuring. The aim of the system is to monitor atmospheric states during an ascent in the suspension under an meteorological balloon.

First of all, attention is given to the Earth's atmosphere and its quantities, then an overview of existing systems for performing aerological measurements. The core of the work is focused on the choice of measurement techniques and the selection of suitable measuring elements for a given scenario. The aerological probe is using atmospheric sensors H1H-8131-021-001, MS5611-01BA03 and PT1000-550 for temperature sensing, while GNSS data is received using the MAX-M8Q-0 module and the measured data is stored on a microSD card and transmitted in parallel using the MTX2-434.650-10 radio module. The system is controlled by STM32L1 from STMicroelectronics programmed in C using HAL abstraction layer.

Klíčová slova

Aerologie, atmosféra, balón, měření, meteorologie, mikrokontrolér, poloha, snímač, sonda, teplota, tlak, trajektorie, vestavěný systém, vítr, vlhkost.

Keywords

Aeorology, atmosphere, balloon, embedded system, humidity, measuring, meteorology, micro-controller, position, pressure, probe, sensor, temperature, trajectory, wind.

Citace

HANÁK, Jiří. *Platforma pro měření atmosférických veličin*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Peter Chudý, Ph.D. MBA

Platforma pro měření atmosférických veličin

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana docenta Petera Chudého. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jiří Hanák
2. června 2021

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Peterovi Chudému, Ph.D. MBA za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	13
2	Atmosféra a její měřené veličiny	15
2.1	Meteorologická služba	15
2.2	Vertikální členění atmosféry	17
2.3	Teplota vzduchu	19
2.4	Vlhkost vzduchu	21
2.5	Rychlost a směr větru	23
2.6	Atmosférický tlak	25
2.7	Chemické složení vzduchu	27
3	Dostupné platformy pro aerologická měření	29
3.1	Profesionální platformy	29
3.2	Amatérské platformy	33
4	Koncept vestavěného systému pro provádění aerologických měření	35
4.1	Vlastnosti platformy	35
4.2	Legislativní požadavky	37
4.3	Koncept platformy	38
4.4	Určování polohy sondy	40
4.5	Komunikační rozhraní a protokoly	44
4.6	Nejistota měření	48
5	Návrh platformy pro aerologická měření	53
5.1	Výběr komponent sondy	54
5.2	Konstrukce sondy	70
5.3	Výběr komponent pozemní stanice	72
5.4	Implementační detaily	75
5.5	Souhrn dosažených vlastností	83
6	Experiment pro ověření návrhu platformy	85
6.1	Modelování stoupání balónu	85
6.2	Kalibrace snímačů a jejich nejistoty	88
6.3	Ověření měření polohy	91
6.4	Letový experiment	92
7	Budoucí vývoj v oblasti aerologických měření	97
8	Závěr	99

Literatura	101
A Porovnání profesionálních rádiových sond	107
B Seznam použitých komponent	109
C Seznam zaznamenávaných veličin	113
D Obvodové schéma sondy	115
E Plošný spoj sondy	121
F Fotodokumentace sondy	125
G Kalibrační list MS5611-01BA03	129

Seznam obrázků

2.1	Vertikální členění zemské atmosféry	17
2.2	Teplota vzduchu v závislosti na nadmořské výšce dle standardní atmosféry	19
2.3	Termorezistivní snímač <i>PT1000</i>	20
2.4	Termoelektrické napětí v závislosti na teplotě vybraných termočlánků	21
2.5	Závislost hustoty a tlaku nasycené vodní páry na teplotě	22
2.6	Všeobecná cirkulace atmosféry na Zemi	24
2.7	Závislost atmosférického tlaku a hustoty vzduchu na nadmořské výšce	25
3.1	Vaisala RS92-SGPD vybavená ozonovým snímačem	29
3.2	Dropsonde RD41	30
3.3	Radiosonde RS41-SGP	31
3.4	iMet-4 Radiosonde	31
3.5	GRAW - DFM-09 – Radiosonde Systems	32
3.6	SRS-C34 - radiosonde	33
3.7	PITS+ modul pro počítače <i>Raspberry Pi</i> verzí A+, B+, V2 B	34
3.8	PITS+ modul pro počítače <i>Raspberry Pi</i> verzi Zero	34
3.9	HABduino modul pro <i>Arduino</i>	34
4.1	Schéma konceptu sondy.	39
4.2	Schéma konceptu stanice.	40
4.3	Srovnání modelů zemského povrchu.	43
4.4	Princip určování polohy dle systému WGS84	44
4.5	Ukázka asynchronního sériového datového rámce UART.	45
4.6	Ukázka generického rámce komunikačního rozhraní I ² C.	46
4.7	Ukázka schématického zapojení 3 zařízení prostřednictvím SPI rozhraní.	46
4.8	Ukázka základních binárních rádiových modulací.	47
5.1	Moduly pro měření relativní vlhkosti vzduchu od společnosti <i>Vaisala</i>	57
5.2	Zvýraznění jednotlivých komponent rádiových sond <i>RS-41</i> a <i>RS-92</i>	57
5.3	GNSS anténa <i>GPS-ANT048</i>	62
5.4	Vizualizace vertikální antény se zemnicí plochou	65
5.5	Snímek pohybu meteorologických sond	66
5.6	Vliv teploty na vybrané typy baterií	68
5.7	Závislost kapacity baterie <i>Energizer Ultimate Lithium</i> na odebíraném proudu s přihlédnutím k pracovní teplotě	69
5.8	Závislosti napětí baterie <i>Energizer Ultimate Lithium</i> na odebíraném proudu	69
5.9	Trojrozměrná vizualizace osazené desky plošného spoje sondy.	71
5.10	Vyznačení jednotlivých komponent sondy.	71
5.11	Modul pro příjem rádiového signálu <i>Radiometrix MTX2</i>	73

5.12	Adaptér pro příjem rádiového signálu	73
5.13	Hlavní okno aplikace dl-fldigi	74
5.14	Yagiho anténa s podélným vyzařováním.	75
5.15	Náhled na přidělené funkce pinů mikrokontroléru.	76
5.16	Sekvenční diagram měřící sekvence.	82
6.1	Závislost poloměru balónu v čase v různých konfiguracích simulace.	87
6.2	Závislost rychlosti stoupání balónu v čase v různých konfiguracích simulace.	88
6.3	Závislost nadmořské výšky balónu v čase v různých konfiguracích simulace.	88
6.4	Průběh vývoje naměřeného tlaku během kalibrace.	91
6.5	Vyznačení naměřené podvzorkované trajektorie v mapě.	92
6.6	Výsledky měření teploty vzduchu během druhého letového experimentu.	93
6.7	Výsledky měření relativní vlhkosti vzduchu během druhého letového experimentu.	94
6.8	Výsledky měření nadmořské výšky během druhého letového experimentu.	95
6.9	Výsledky měření rychlostí sond během druhého letového experimentu.	96
6.10	Výsledky měření kurzu sond během druhého letového experimentu.	96
F.1	Uložení platformy v polystyrenovém obalu.	125
F.2	Zadní strana platformy.	125
F.3	Místo dopadu prvního letového experimentu.	126
F.4	Letová soustava při čekání na start druhého letového experimentu.	126
F.5	Průběh letového experimentu.	127
F.6	Místo dopadu druhého letového experimentu.	127

Seznam tabulek

2.1	Parametry RTD snímačů dle jednotlivých tříd normy DIN EN IEC 60751	21
2.2	Složení suchého vzduchu v troposféře	27
2.3	Objemové složení atmosféry v závislosti na nadmořské výšce	28
4.1	Koeficient rozšíření k_a pro standardní nejistotu typu A.	49
5.1	Přehled snímačů pro měření relativní vzdušné vlhkosti výrobců <i>Honeywell</i> a <i>Texas Instruments</i>	58
5.2	Vybrané charakteristiky vybraných snímačů pro měření absolutního tlaku výrobců <i>Honeywell</i> a <i>TE Connectivity</i>	60
5.3	Přehled GNSS přijímačů společnosti <i>U-Blox</i>	61
5.4	Přehled dynamických modelů GNSS přijímače	81
6.1	Přehled diferencí atmosférických veličin při kroku výšky 2 m v různých výškách standardní atmosféry.	87
6.2	Soupis vypočítaných nejistot typu B pro jednotlivé snímače.	89
6.3	Výsledky kalibrace snímače <i>MS5611-01BA03</i>	90
6.4	Výsledky ověření věrohodnosti měření <i>PT1000-550</i>	91
A.1	Souhrn význačných parametrů vybraných profesionálních rádiových sond.	107

Seznam symbolů

Seznam zkratk

Zkratka	Význam
ADC	Analog-to-Digital Converter
AFSK	Audio Frequency-Shift Keying
APRS	Amateur Position Reporting Service
ASK	Amplitude Shift Keying
AVAPS	Airborne Vertical Atmospheric Profiling System
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
CoCom	Coordinating Committee for Multilateral Export Controls
CR	Carriage Return
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSV	Comma-Separated Values
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
DPS	Deska plošného spoje
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FATFS	File Allocation Table File System
FSK	Frequency Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPIO	General-Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HAB	High Altitude Ballooning
HAL	Hardware Abstract Layer
I2C	Inter-Integrated Communication
IMU	Inertial Measurement Unit

Zkratka	Význam
ISA	International Standard Atmosphere
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
JTAG	Joint Test Action Group
LED	Light-Emitting Diode
LF	Line Feed
LL	Low Level
LQFP	Low Profile Quad Flat Pack
LSB	Least Significant Bit
MCU	Microcontroller Unit
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
NASA	National Aeronautics and Space Administration
MSB	Most Significant Bit
NMEA	National Marine Electronics Association
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTC	Negativní teplotní koeficient
PSK	Phase Shift Keying
PTC	Pozitivní teplotní koeficient
PTU	Pressure, Temperature, hUmidity
RH	Relative Humidity
RTC	Real-time clock
RTTY	Radio Teletype
SCL, SCLK	Serial Clock
SDA	Serial Data
SDR	Software-Defined Radio
SiP	System in Package
SMD	Surface-Mount Device
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random-Access Memory
SS/CS	Slave Select/Chip Select
SWD	Serial Wire Debug
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillator
THT	Through-Hole Technology
TRL	Technology Readiness Level
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

Zkratka	Význam
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
UKHAS	UK High Altitude Society
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter
UTC	Universe Time Coordinated
WGS84	World Geodetic System 1984
WMO	World Meteorological Organization

Řecké symboly

Symbol	Jednotka	Význam
γ	1	Adiabatický index plynu
λ	$^{\circ}$	Zeměpisná délka
λ_t	m	Vlnová délka
π	1	Ludolfovo číslo
ρ_a	kg m^{-3}	Hustota vzduchu
ρ_d	kg m^{-3}	Hustota suchého vzduchu
ρ_v	kg m^{-3}	Hustota vodní páry
ϱ_0	kg m^{-3}	Hustota vzduchu při teplotě 15 °C
χ	1	Koeficient rozložení zdroje nejistoty typu B
ψ	$^{\circ}$	Zeměpisná šířka

Latinské symboly

Symbol	Jednotka	Význam
A	1	Amplituda
A_{Pt}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	Koeficient A pro výpočet rezistivity platinového snímače
A_i	1	Citlivostní koeficient
B_{Pt}	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	Koeficient B pro výpočet rezistivity platinového snímače
c	ms^{-1}	Rychlost světla
C_{Pt}	$^{\circ}\text{C}^{-4}$	Koeficient C pro výpočet rezistivity platinového snímače
c_D	1	Součinitel odporu
C_i	1	Kalibrační koeficient i
c_p	1	Dělicí koeficient frekvence čítače
c_T	1	Perioda čítače
d	1	Počet destinných míst
f	Hz	Frekvence

Symbol	Jednotka	Význam
F_{FL}	N	Vzlatková síla
f_{GHz}	GHz	Frekvence v GHz
f_0	Hz	Frekvence pro přenos logické 0
f_1	Hz	Frekvence pro přenos logické 1
f_c	Hz	Frekvence hodinového signálu
F_D	N	Odpor prostředí
g	$m s^{-2}$	Tíhové zrychlení
H_R	%	Relativní vlhkost
h	m	Výška nad hladinou moře
H	m	Výška nad referenčním elipsoidem
H_r	%RH	Surová hodnota relativní vlhkosti
k_A	1	Koeficient rozšíření nejistoty typu A
k_B	1	Koeficient rozšíření nejistoty typu B
k_e	1	Koeficient rozšíření rozšířené nejistoty
L	dB	Atenuace
m	kg	Hmotnost
N	m	Výška geoidu nad referenčním elipsoidem
o	m	Obvod kružnice/elipsy
o_1	m	Obvod elipsy referenčního elipsoidu na rovníkové rovině
o_2	m	Obvod elipsy referenčního elipsoidu na podledníkové rovině
p	Pa	Atmosférický tlak
p_0	Pa	Tlak vzduchu při hladině moře
P_i	W	Vstupní výkon
p_o	mbar	Posun tlaku pro dané teplotě
P_o	W	Výstupní výkon
p_r	mbar	Surová hodnota atmosférického tlaku
p_s	mbar	Citlivost tlaku při dané teplotě
R	Ω	Elektrická rezistivita
r	m	Poloměr kružnice
R_{100}	Ω	Rezistivita při teplotě 100 °C
R_0	Ω	Rezistivita při teplotě 0 °C
R_d	$J kg^{-1} K^{-1}$	Měrná plynová konstanta suchého vzduchu
r_1	m	Délka hlavní poloosy referenčního elipsoidu
r_2	m	Délka vedlejší poloosy referenčního elipsoidu
R_a	$J K^{-1} mol^{-1}$	Reálná plynová konstanta pro vzduch
R_e	1	Reynoldovo číslo

Symbol	Jednotka	Význam
R_t	Ω	Rezistivita při neznámé teplotě
R_v	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Měrná plynová konstanta vodní páry
s	m	Dráha
S_A	$\mu\text{V K}^{-1}$	Seebeckův koeficient pro materiál A
S_B	$\mu\text{V K}^{-1}$	Seebeckův koeficient pro materiál B
t	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
T	K	Teplota
t_{sn}	s	Doba šíření signálu od známého n-tého bodu
T_0	K	Absolutní teplota (273,15 K)
T_1	K	Teplota v prvním spoji termoelektrického snímače
T_2	K	Teplota v druhém spoji termoelektrického snímače
t_d	s	Rozdíl mezi systémovým a skutečným časem
t_r	$^{\circ}\text{C}$	Surová hodnota teploty
t_s	s	Doba šíření signálu
T_v	K	Virtuální teplota suchého vzduchu
TKR	1	Teplotní součinitel elektrického odporu
U	V	Elektrické napětí
U_e	1	Rozšířená nejistota
u_{Bz}	1	Zdroj nejistoty typu B
u_A	1	Nejistota měření typu A
u_B	1	Nejistota měření typu B
u_c	1	Kombinovaná nejistota
v	m s^{-1}	Rychlost
V	m^3	Objem tělesa
V_{cc}	V	Napájecí napětí
w	%	Měrná vlhkost
X	m	Pozice neznámého bodu v ose x
x_n	m	Pozice známého n-tého bodu v ose x
Y	m	Pozice neznámého bodu v ose y
y_n	m	Pozice známého n-tého bodu v ose y
Z	m	Pozice neznámého bodu v ose z
z_n	m	Pozice známého n-tého bodu v ose z

Kapitola 1

Úvod

Lidé se snaží předpovídat vývoj počasí, aby mohli odpovědně plánovat – například vybrání vhodného termínu pro akci pod širým nebem, jaké si zabalit oblečení na dovolenou, jak velké si má udělat zásoby dřeva na zimu. Pro kvalitní předpověď počasí jsou nutná data, a to nejen v blízkosti zemského povrchu, ale i z vyšších vrstev atmosféry, kterou se zabývá aerologie.

Kapitola **Atmosféra a její měřené veličiny** popisuje strukturu atmosféry Země a základní principy tvorby počasí se zaměřením na jednotlivé sledovatelné veličiny a způsoby jejich měření. Popisy aktuálně dostupných sond pro aerologická měření jsou uvedeny v kapitole **Dostupné platformy pro aerologická měření**. V kapitole **Koncept vestavěného systému pro provádění aerologických měření** jsou popsány parametry platformy, která by byla vhodná k provádění aerologických měření a její samotný koncept. Její návrh je podrobně sepsán v kapitole **Návrh platformy pro aerologická měření**. Kapitola **Experiment pro ověření návrhu platformy** dokumentuje praktické ověření funkčnosti sondy v reálných podmínkách. Uvážení budoucího vývoje platformy je obsaženo v kapitole **Budoucí vývoj v oblasti aerologických měření**.

Kapitola 2

Atmosféra a její měřené veličiny

Zemská atmosféra je plynný obal Země, který je nezbytný k životu, neboť všichni živočišové potřebují pravidelný příjem kyslíku. Nelze opomenout její další nezbytnou úlohu a tou je ochrana organismů před škodlivým ultrafialovým zářením pocházejícího z kosmického prostoru. Nejde však jen o ultrafialové záření, ale i o celkovou energii, která je vyzařována Sluncem směrem k Zemi, která činí 160 miliardů joulů za sekundu. V případě absence atmosféry by tato energie ohřála Zemi v oblasti rovníku na 80 °C, avšak díky odrazům slunečního záření od atmosféry a částečné absorpci mraky dorazí k zemskému povrchu přibližně jen 47 % tohoto množství. Tak jako lidské tělo se chladí pocením, zemský povrch je ochlazován za pomoci vypařování vody, které spotřebuje značnou část této energie [54].

Aby bylo možné předpovídat počasí, museli bychom znát v přiměřeném měřítku chemické a fyzikální vlastnosti jednotlivých částí atmosféry a zemského povrchu v aktuálním čase, přičemž bychom měli k dispozici správný a úplný model tohoto prostředí. Při obsáhnutí tolika vstupních informací je numerický výpočet velmi výpočetně náročný, a to i při použití těch nejvýkonnějších superpočítačů na světě. Z vícero důvodů je stavový model atmosféry značně zjednodušen tak, aby bylo možné v přijatelném čase vypočítat (předpovídat) vývoj stavových veličin atmosféry. Přesná týdenní předpověď by ztrácela smysl, pokud by její výpočet trval podobně dlouhou dobu.

Uvážíme-li, že máme vhodný model popisující počasí na Zemi v dostatečné kvalitě, potřebujeme jen zdánlivě kvalitní stavová data, a to nejen z pozemních meteorologických stanic, ale i z vyšších vrstev atmosféry.

2.1 Meteorologická služba

Hlavní náplní meteorologa bylo ještě donedávna pravidelné přímé odečítání hodnot stavových veličin z meteorologických přístrojů na daných stanovištích a vytváření záznamů a pozorování, což značně limitovalo intenzitu a přesnost těchto měření. Avšak v posledních letech byly vyvinuty meteorologické stanice, které jsou schopny měřené veličiny v přesně specifikovaných intervalech zasílat do sběrných center, většinou meteorologických stanic či observatoří. Díky tomu může meteorolog věnovat více svého času analýze naměřených dat a na jejich základě provádět patřičné odhady. V České republice má na starost sběr meteorologických dat *Český hydrometeorologický ústav* (ČHMÚ), který zaštiťuje profesionální staniční síť na našem území.

2.1.1 Světová meteorologická služba

Jelikož meteorologie má globální charakter, je potřeba, aby jednotlivé státy při provádění meteorologických měření postupovaly se stejnou metodikou, aby výsledné měření bylo co nejpřesnější a následné analýzy pravdivější. Z tohoto důvodu byla dne 23. 3. 1953 založena *Světová meteorologická organizace* (WMO) se sídlem v Ženevě. Československá republika byla jedním z 22 zakládajících států, přičemž k roku 2011 již sdružovala 183 států a 6 teritorií [85]. Jejím nejvyšším orgánem je kongres, který se schází jednou za 4 roky. WMO vydává předpisy a metodické pokyny pro meteorologická měření pro zajištění jednotných meteorologických dat a informací [86].

2.1.2 Staniční měření

Základ meteorologického měření pokrývá měření atmosférického tlaku, teploty vzduchu a relativní vlhkosti, souhrnně označované zkratkou PTU. Kromě těchto základních veličin se běžně zaznamenává také směr větru a jeho rychlost, úhrn srážek, výška sněhové pokrývky, doba slunečního svitu, přízemní teplota ve výšce 5 cm nad zemí, či příkon fotonového dávkového ekvivalentu. Za nadstandardní zaznamenávané veličiny lze následně považovat teplotu půdy, výpar z vodní hladiny, sluneční záření a čistotu ovzduší. Tato měření se provádí v hodinových intervalech Světového koordinovaného času (UTC) [86].

2.1.3 Aerologická měření

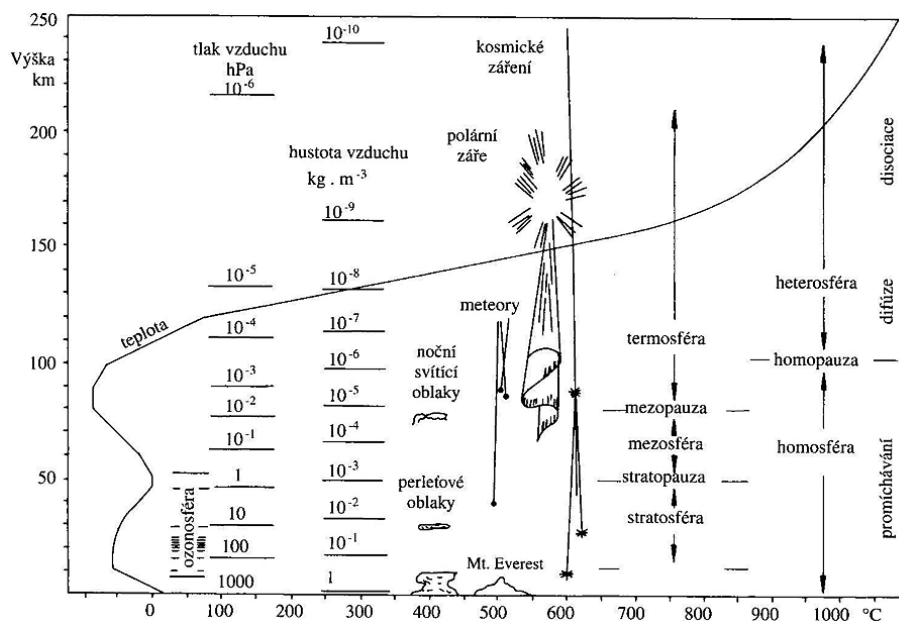
Do této kategorie se řadí měření pomocí meteorologických radarů, družic, letadel, raket a balónů. Jedná se o měření veličin, jež není možné měřit ze zemského povrchu. Mezi provozované měření patří nejčastěji PTU doplněné o údaje o směru a rychlosti větru. Alternativně je možné provádět i měření ozonu nebo radioaktivity.

- Radar — vysílá v pravidelných intervalech mikrovlnné impulzy a zachytává jejich odrazy od kapek vody, sněhových vloček a jevů spojených s oblačností. Pro blízké srážky se signál vrátí dříve, oproti vzdálenějším, kdy se vrací o něco později dle nutné doby letu vyslaného elektromagnetického impulzu pro překonání dané vzdálenosti v obou směrech [14].
- Družice — obíhají Zemí ve výšce 600–1 500 km na polárních drahách s dobou obletu 97–116 minut, nebo ve výšce 36 000 km na dráze geostacionární nad rovníkem s dobou obletu jednoho dne. Snímají nepřetržitě zemský povrch v různých spektrálních oblastech tak, aby pozorování oblačnosti bylo nezávislé na denní době, případně jiných okolnostech. Infračervené spektrum také podává informaci o teplotních poměrech [14].
- Balón — malá sonda zavěšená na balónu s nosným plynem, který stoupá vzhůru až do výšky 40 km, dokud balón nepraskne. Balóny se vypouští většinou v 6hodinových intervalech [54].

Český hydrometeorologický ústav provozuje aerologické stanice v Prostějově a v Praze-Libuši. Jednotlivá měření jsou prováděna v 00, 06, 12, 16 hodin světového času [14]. Od roku 1977 stanice Praha-Libuš provádí rovněž měření ozonu a od roku 1994 i měření radioaktivity (β a γ záření) [86].

2.2 Vertikální členění atmosféry

Zemská atmosféra vykazuje ve vertikálním směru různé trendy, které vedly k rozčlenění atmosféry na několik sfér a vrstev. Jejich přehled je uveden na obrázku 2.1, který reflektuje výšky především ve středních zeměpisných šířkách.



Obrázek 2.1: Vertikální členění zemské atmosféry, převzato z [37].

Mezinárodní standardní atmosféra

Jelikož rozložení veličin charakterizující zemskou atmosféru se s nadmořskou výškou nepravidelně mění, byl zejména pro potřeby letectví vytvořen model ideální zemské atmosféry označovaný jako *Mezinárodní standardní atmosféra* (ISA), kdy dané veličiny jsou reprezentovány konstantními středními hodnotami. Model se vyznačuje následujícími vlastnostmi [9]:

- předpokládá se homogenní složení vzduchu, tj. 78 % dusík, 21 % kyslík, 1 % ostatní plyny,
- tíhové zrychlení $g = 9,80665 \text{ m s}^{-2}$,
- při hladině moře je tlak vzduchu $p_0 = 101325 \text{ Pa}$, hustota vzduchu $\rho_0 = 1,225 \text{ kg m}^{-3}$ při teplotě vzduchu $t_0 = 15 \text{ °C}$.

Troposféra

Obvykle, kdy se mluví o atmosféře nebo o počasí, se myslí ve vertikálním rozdělení zemské atmosféry právě tato sféra. Její vlastnosti jsou značně proměnlivější než u ostatních vrstev atmosféry, neb je velmi ovlivňována dynamickými vlastnostmi zemského povrchu. Na její výšku, která není konstantní, má kromě geografické polohy výrazný vliv i roční období, přičemž může dosahovat v oblasti rovníku výšky až 15 km [54]. Gradient teploty je v ní záporný, a to až do globálního teplotního minima celé zemské atmosféry $-56,5^{\circ}\text{C}$ při $-0,0065\text{ K m}^{-1}$ dle standardní atmosféry [9].

Stratosféra

Stratosféra je na rozdíl od troposféry stabilní sféra, ve které se vyskytuje jen velmi malé množství vodních par. Proto je v ní i minimum oblačnosti. Gradient teploty je v ní kladný. Stratosféra obsahuje pásmo, jež se díky větší koncentraci ozonového plynu nazývá ozonovou vrstvou. Ta se nachází přibližně ve výšce 25 km nad mořem a pohlcováním většiny ultrafialových paprsků přicházejících z kosmického prostoru chrání živé organizmy. Ačkoli se počasí utváří především v troposféře, stratosféra má na něj jistý vliv. Z uvedeného plyne vhodnost provádět měření i v této sféře [54].

Mezosféra

Tato část v porovnání s ostatními částmi atmosféry není nijak výrazná. Mezosféra se vyznačuje záporným teplotním gradientem. Odděluje svrchní vrstvu stratosféry *stratopauzu* s konstantní teplotou a termosféru s kladným teplotním gradientem [9].

Termosféra

Termosféra je rovněž nazývána jako *Ionosféra* pro její malou ionizaci vzduchu (kolem 1 %) a značně vysoké teploty, které při přechodu do exosféry dosahují až 1 460 K [9]. Jednou z vlastností této vrstvy je díky obsahu ionizovaných plynů schopnost odrážet elektrické vlny přicházející ze zemského povrchu, díky čemuž je možné komunikovat pomocí rádiových vln na obrovské vzdálenosti bez nutnosti přímého výhledu mezi jednotlivými účastníky komunikace. Koncentrace plynů je zde tak malá, že obsahuje jen jednu miliardtinu celkové hmotnosti atmosféry. K ionizaci plynů dochází při nárazu částic s vysokou energií pocházejících ze Slunce, kdy se elektrony odpoutají od molekul, což způsobuje rychle se pohybující plazma. Jelikož je k ionizaci třeba slunečního záření, koncentrace plazmy není stálá a v noci klesá [54].

Exosféra

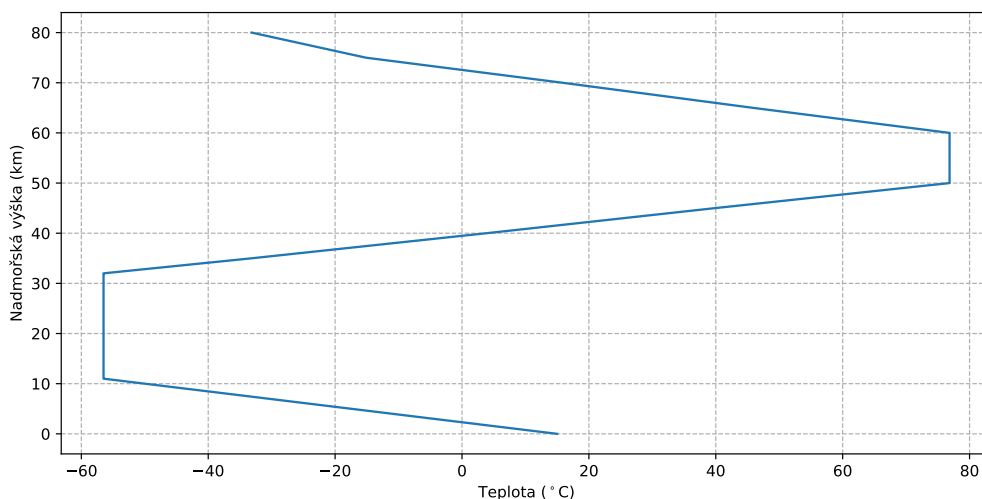
Jedná se o nejvrchnější část atmosféry, která definuje hranici mezi Zemí a kosmickým prostorem. Její svrchní hranice odpovídá úrovni, kdy je koncentrace částic srovnatelná s koncentrací v mezihvězdném prostoru [9]. Ačkoli je zde velmi vysoká teplota, pro kosmické lodě to nepředstavuje výrazný problém, a to díky velmi malé koncentraci plynů, se kterými by probíhala výměna tepelné energie.

2.3 Teplota vzduchu

Hlavní sledovanou veličinou v atmosféře je její teplota, protože má přímý vliv na ostatní měřené veličiny. Teplota neustále kolísá, ať už střídáním dne a noci, nebo střídáním ročních období. Teplota vzduchu v závislosti na nadmořské výšce dle standardní atmosféry je uvedena na obrázku 2.2.

Adiabatické ochlazování

Jednou z příčin ochlazování atmosféry je adiabatické ochlazování, které vychází z rozdílu hustot atmosféry. Vzduch ohřátý od zemského povrchu stoupá vzhůru, přičemž se pod ním vytváří oblasti s nižším tlakem, do kterých se přesouvá chladnější vzduch, přičemž při jeho stoupaní díky poklesu tlaku dochází k rozpínání, které spotřebovává část tepelné energie a postupně se tím ochlazuje. Za normálních okolností se vzduch ochladí o 3°C na každých 300 metrů převýšení [54].



Obrázek 2.2: Teplota vzduchu v závislosti na nadmořské výšce dle standardní atmosféry [9].

2.3.1 Metody měření

Měření teploty vzduchu je problematické především proto, že je nutné pro určení správné teploty dosáhnout tepelné rovnováhy mezi samotným snímačem teploměru a okolního vzduchu. Měření je ovlivňováno zejména:

- tepelnou kapacitou měřeného objektu, jež musí být větší než tepelná kapacita snímače,
- teplotním odporem vůči čidlu, což výrazně ovlivňuje rychlost měření,
- tepelnou kapacitou, jež především ovlivňuje rychlost měření.

Skleněný kapalinový teploměr

Měření pomocí skleněného kapalinového teploměru je založeno na principu rozdílné teplotní roztažnosti kapaliny a nádoby, ve které je kapalina uložena. K tomuto účelu se

jako kapalina nejčastěji používá líh, toluen nebo rtuť. Přesnost měření se odvíjí od velikosti nádoby [85].

Deformační teploměr

Měření pomocí deformačního teploměru je založeno na různé roztažnosti kovů vystavených stejné teplotě. Teploměr tvořen bimetalovou destičkou nebo prstencem s jedním pevným koncem. Destička se dle změny teploty roztahuje nebo smršťuje, přičemž výchylka volného konce, ovlivněna touto změnou, určuje teplotou na cejchované stupnici [85].

Termorezistivní snímač

Základem je homogenní prvek, jehož rezistivita je závislá na teplotě. Díky své konstrukci jsou velmi malé a díky tomu i rychlé (menší tepelná kapacita). Tyto teploměry dosahují vyšší citlivosti, je však nutné použít správnou metodu pro měření elektrického odporu, aby rezistivita vodičů výrazně neovlivňovala výsledky měření.

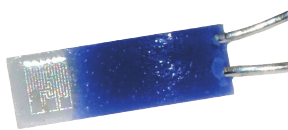
Dle typu závislosti rezistivity na teplotě rozlišujeme:

- PTC (pozitivní teplotní koeficient) — rezistivita většiny kovů je závislá na teplotě, kdy s rostoucí teplotou roste jejich rezistivita. U platinových snímačů je závislost takřka lineární,
- NTC (negativní teplotní koeficient) — u polovodičů (termistorů) s rostoucí teplotou naopak rezistivita klesá (čistý křemík), velmi nelineární charakteristika.

U průmyslových snímačů *PT100*, *PT500*, *PT1000* a dalších je výsledná rezistivita počítána dle vztahu (2.1a) pro záporné teploty a dle vztahu (2.1b) pro kladné teploty. Typický snímač vyrobený metodou tenké napařované vrstvy je vyobrazen na obrázku 2.3.

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A_{Pt} \cdot t + B_{Pt} \cdot t^2 + C_{Pt} \cdot (t - 100 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot t^3] \quad (2.1a)$$

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A_{Pt} \cdot t + B_{Pt} \cdot t^2) \quad (2.1b)$$



Obrázek 2.3: Termorezistivní snímač *PT1000*, převzato z [87].

Platinové snímače jsou dle normy DIN 60751 rozděleny do tolerančních tříd, jejichž přehled je uveden v tabulce 2.1.

Termoelektrický snímač

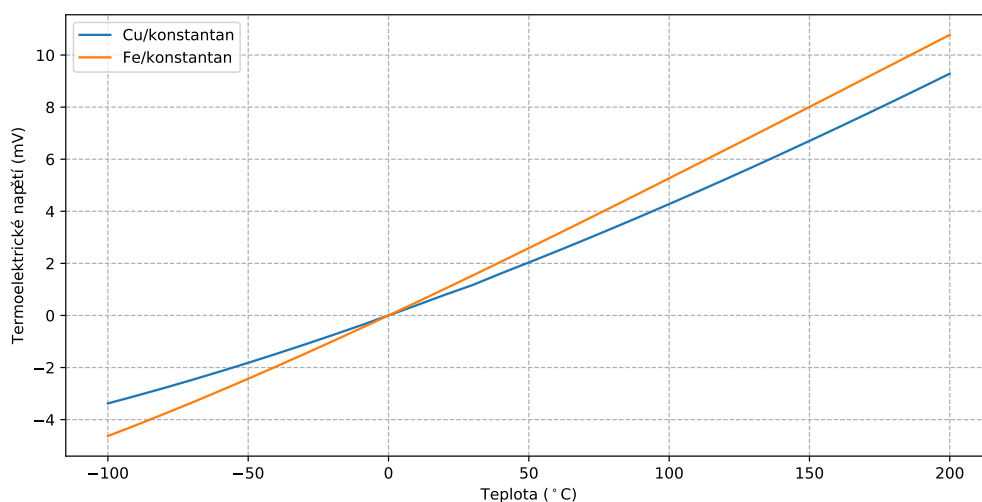
Jádrem termoelektrického snímače je termočlánek, který využívá tzv. Seebeckova jevu, kdy při různých teplotách na obou spojích dvou různých kovů vzniká malé napětí, řádově $mV K^{-1}$. Nejčastější dvojicí kovů jsou měď s konstantanem a železo s konstantanem, jejichž závislosti termoelektrického napětí na teplotě jsou uvedeny v grafu 2.4. Pomocí bimetalového teploměru nelze měřit absolutní hodnotu teploty, pouze rozdíl teploty oproti

Tabulka 2.1: Parametry RTD snímačů dle jednotlivých tříd normy DIN EN IEC 60751 [87].

Třída	Teplotní rozsah (°C)		Toleranční pásmo (°C)
	Navinutý drát	Tenký film	
B	−196 až +600	−50 až +500	$0,30 + 0,005 \cdot t $
A	−100 až +450	−30 až +300	$0,15 + 0,002 \cdot t $
AA	−50 až +250	0 až +150	$0,10 + 0,0017 \cdot t $

referenčnímu bodu. Výsledné napětí je počítáno pomocí vztahu (2.2). Bimetalické termoměry vykazují v porovnání s termorezistivními snímači nižší přesnost i stabilitu. Samotné měření je obtížné kvůli velmi malému napětí.

$$U = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.2)$$



Obrázek 2.4: Termoelektrické napětí v závislosti na teplotě vybraných termočlánků [9].

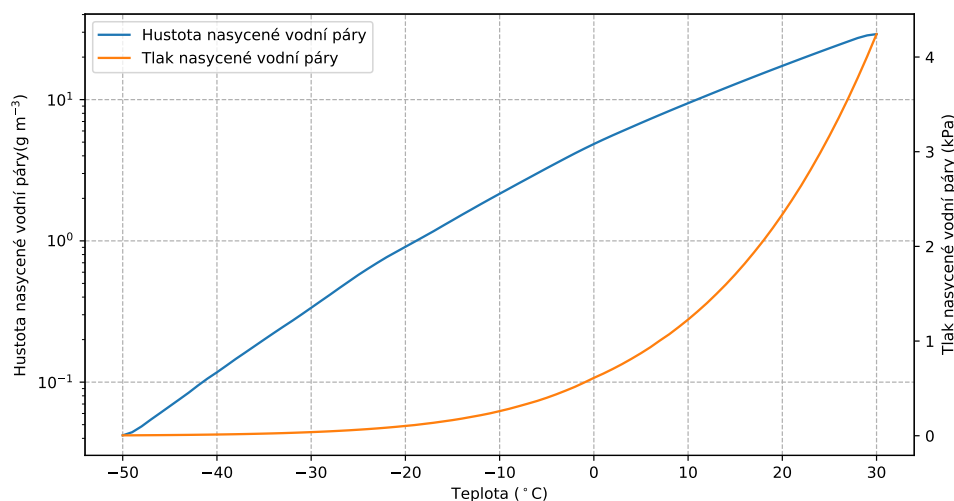
2.4 Vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu je vyjádřen poměr vodních par obsažených ve vzduchu vůči plně nasycenému vzduchu. Vodní páry vznikají především výparem (evaporací) z vodních ploch a povrchu půdy, případně transpirací, jež je výpar vody z rostlin. Kromě přímého vzniku při zemském povrchu může vlhkost vzniknout přechodem z jiného skupenství vody, které se vyskytuje v atmosféře. Vypařování spotřebovává tepelnou energii, která je dodávána ze slunečního záření. Předpokládá se, že v celosvětovém měřítku, je okolo 25 % slunečního záření spotřebováno při vypařování [48]. Polovina objemu vodních par je lokalizována do výšky 1,5 km nad zemským povrchem, přičemž 99 % vodních par je obsaženo v troposféře, z čehož lze vyvodit, že s rostoucí nadmořskou výškou dochází k poklesu vlhkosti vzduchu [86].

Vlhkost vzduchu se vyjadřuje následujícími veličinami:

- napětí (tlak) vodních par — tlak vodní páry ve směsi se suchým vzduchem,
- relativní vlhkost vzduchu — poměr skutečného napětí vodních par vůči maximálně možnému napětí nasycení při dané teplotě,
- sytostní doplněk — nazýván také jako deficit vlhkosti, je rozdíl mezi maximálním napětím (tlakem) vodních par při dané teplotě a skutečnému napětí vodních par,
- absolutní vlhkost vzduchu — vyjadřuje absolutní množství vodních par v jednotce objemu vzduchu (g m^{-3}),
- rosný bod — teplota v $^{\circ}\text{C}$, při které by vodní páry nacházející se ve vzduchu jej mohly zcela nasýtit. Relativní vlhkost vzduchu dosahuje 100 %.

Jakmile dojde k plnému nasycení vzduchu vodními parami, začne zpětný proces přeměny vodní páry na kapalinu – kondenzace, kdy se vytváří drobné kapky, které vnímáme jako mraky. K této situaci nemusí dojít jen zvyšováním poměru vodních par ve vzduchu, nýbrž také při snižování teploty, kdy se rovněž snižuje rosný bod. Grafické znázornění závislosti hustoty a tlaku nasycené vodní páry na teplotě je uvedeno na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Závislost hustoty a tlaku nasycené vodní páry na teplotě [9].

2.4.1 Metody měření

Při měření vlhkosti vzduchu musíme v rozsahu záporných teplot počítat s vytvářením námrazy (ledu), která výrazně ovlivňuje výsledek měření.

Psychrometr

Skládá se ze dvou termočlánků, kde jeden měří teplotu suchého vzduchu a druhý vlhkého. Z naměřených teplot se určí psychrometrická diference, jež přímo odpovídá absolutní vlhkosti vzduchu. Teplota suchého vzduchu je vždy vyšší než teplota vzduchu vlhkého [85].

Vlasový vlhkoměr

Vlhkoměr je tvořen odmaštěným lidským vlasem, který se při zvyšování poměrné vlhkosti vzduchu prodlužuje a při snižování zkracuje [85].

Kapacitní hygrometr

Princip spočívá v měření kapacity kondenzátoru, jehož dielektrikum mezi dvěma elektrodami je závislé na vlhkosti vzduchu. Ačkoliv by dielektrikum mohlo být tvořeno samotným vzduchem, dané řešení by nebylo pro přesná měření použitelné. Obvykle se používá jako dielektrikum hygroskopická vrstva polymeru [6].

Rezistivní hygrometr

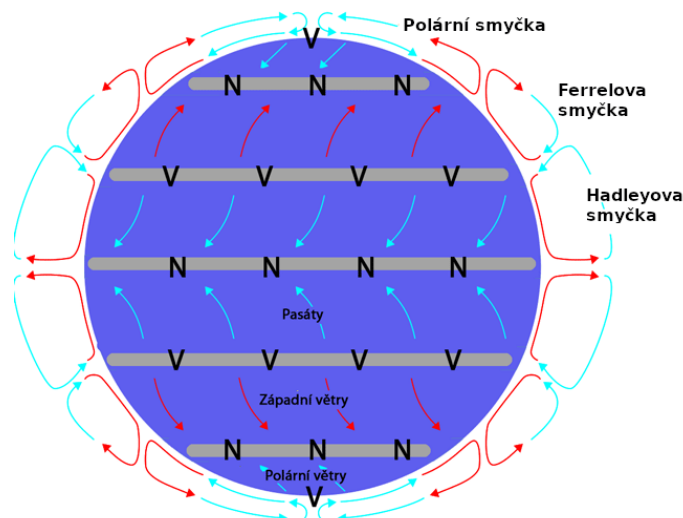
Hygrometry pracující na principu změny elektrického odporu jsou konstruovány z materiálů s malou rezistivitou, která je závislá na změně vzdušné vlhkosti. Konstrukčně jsou hygrometry tvořeny elektrodami z ušlechtilých kovů, například zlatem, stříbrem nebo platinou, mezi kterými jsou materiály, jež tvoří jádro snímače, a těmi jsou obvykle polyelektrolyty nebo vodivé polymery [6].

2.5 Rychlost a směr větru

V zemské atmosféře neustále probíhají různé procesy, které mají za následek přesouvání mas vzdušných plynů jak v horizontálním, tak i ve vertikálním směru. Nejvýznamnější příčinou je nerovnoměrné ohřívání zemského povrchu slunečním zářením, kdy oblasti rovníku svou pozicí přijímají mnohem větší energii ze slunečního záření než oba póly, což má za následek, že v oblasti rovníku stoupá teplý vzduch vzhůru, který vysoko v atmosféře vytlačuje studený vzduch směrem k pólům, přičemž od nich proudí chladný vzduch při zemském povrchu směrem k rovníku. Tento proces proudění se nazývá konvekce. Kvůli rotaci Země kolem vlastní osy a nedokonalé izolaci proudění od rovníku k pólům a naopak, vytváří se i lokální smyčky, a to v pásmech mezi rovníkem a rovnoběžkami na 30. stupni nazývané Hadleyovy smyčky, jejichž větry jsou známé pod názvem *pasáty*, mezi rovnoběžkami na 30. a 60. stupni nazývané Ferrelovy smyčky, a mezi rovnoběžkami na 60. stupni a póly označované jako polární cirkulace. Schématický pohled na tato proudění je uveden na obrázku 2.6, ve kterém V označuje oblasti vysokého tlaku vzduchu, N oblasti nízkého tlaku vzduchu, šipky okolo Země označují směr proudění vzduchu ve vertikálním řezu atmosféry. Ferrelova smyčka se na rozdíl od ostatních zmíněných vyznačuje prouděním vzduchu podél povrchu směrem k pólům [54].

2.5.1 Tryskové proudění

Na hranici tří nejdůležitějších cirkulačních smyček na obou polokoulích se setkávají vzduchové masy značně rozdílných teplot, což způsobuje velké kolísání tlaku, který se vyrovnává velmi silnými větry, které se nazývají tryskové proudy (*jet streams*). Tyto proudy vanou ve výšce mezi 8 až 15 kilometry od západu na východ. Mohou dosahovat rychlosti až 800 km h^{-1} . Během zimních období jsou teplotní rozdíly výraznější, a proto i výsledné proudění dosahuje vyšších rychlostí. Jelikož asijská pevnina během léta absorbuje tolik slunečního záření, že je vzduch teplejší než v oblastech u rovníku, při stoupání této masy teplého vzduchu vznikají opačné tryskové proudy vanoucí od východu na západ [14, 54].



Obrázek 2.6: Všeobecná cirkulace atmosféry na Zemi, převzato z [59].

2.5.2 Brízy

Pravidelné střídání dne a noci kromě jiného způsobuje tvorbu vánků, jež se nazývají *brízy*. Jsou způsobeny rozdílnou schopností absorpce slunečního záření u dvou sousedících ploch, kdy jedna se ohřívá rychleji než druhá. Tento jev můžeme pozorovat u velkých jezer nebo u pobřeží moří, kdy při rozednění je pevnina ohřívána rychlejším tempem než vodní hladina (protože má větší tepelnou kapacitu) a vítr vane k pevnině a po soumraku následně od pevniny. Podobný jev lze pozorovat v údolích, které je obklopeno horami [54].

2.5.3 Metody měření

Díky tomu, že vítr vane většinou ve smyčkách, ať už vodorovných nebo svislých, pro reprezentativní hodnotu postačí jen rychlost a směr větru v horizontálním směru. Následující popsané metody lze rozdělit do dvou kategorií:

- kontaktní — pro měření je nutné mít měřicí aparát přímo vystavený proudění vzduchu,
- bezkontaktní — rychlost a směr proudění vzduchu je odhadnut z pozorovatelného jevu.

Družicové pozorování

Jedná se o bezkontaktní měření, kdy je rychlost větru v troposféře odhadnuta ze satelitních snímků z pohybu oblaků na daných snímcích, které se na nich vyskytují. Pokud jsou k dispozici snímky stejného místa z různých úhlů ve stejném čase, lze jejich složením určit i výšku větru. V nižších vrstvách troposféry dosahuje metoda přesnosti až 3 m s^{-1} , s rostoucí výškou přesnost klesá [85].

Radarové pozorování

Opět se jedná o bezkontaktní měření. Mikrovlnné radary (skaterometry) umístěné na satelitu registrují rozptyl centimetrových radiových vln od malých kapilárových vln na

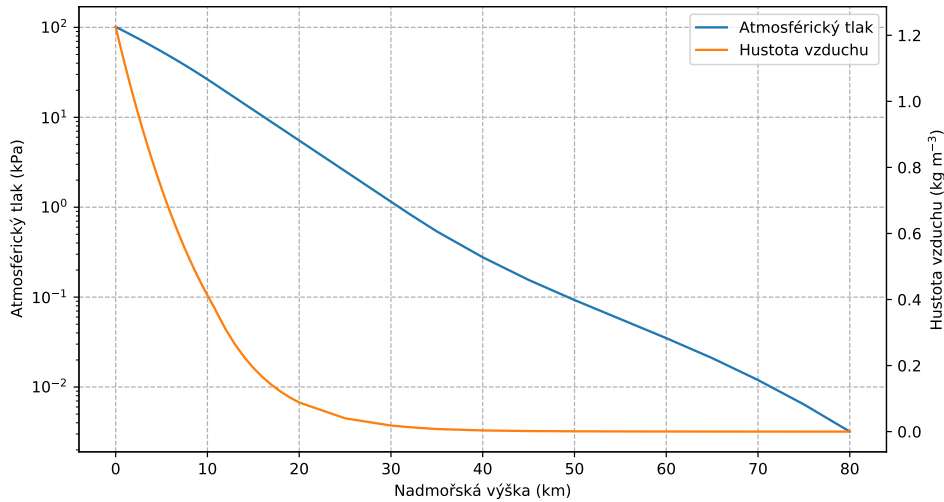
povrchu oceánu, kdy rychlost větru koresponduje s rychlostí pohybu těchto vln. Na rozdíl od předchozí metody, přesnost měření dosahuje až 2 m s^{-1} pro měření rychlosti [85].

Anemometr

Anemometr registruje větry kontaktní metodou. Měřícím prvkem anemometru je čítač otáček vrtule. Součástí anemometru bývá i směrová korouhev umožňující určení směru větru.

2.6 Atmosférický tlak

Ačkoli okolní vzduch není za normálních okolností „vidět“, působí na nás poměrně značným tlakem $101,3 \text{ kPa}$ u hladiny moře. Jak již bylo popsáno v sekcích 2.3 a 2.5, prouděním vzduchu vznikají oblasti s různým atmosférickým tlakem, který při svém vyrovnávání opět vytváří proudění vzduchu. Tlak se samozřejmě snižuje i s nadmořskou výškou v důsledku snižování hustoty vzduchu. Tento jev je zobrazen na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Závislost atmosférického tlaku a hustoty vzduchu na nadmořské výšce [9].

Tak jak vrstevnice na turistické mapě spojují body o stejné nadmořské výšce, na meteorologické mapě spojují izobary místa se stejným atmosférickým tlakem [54]. Tlak v různých výškách atmosféry lze za obvyklých okolností odhadnout za předpokladu znalosti tlaku v určité výšce a virtuální teplotě, a to dle rovnice 2.3 [37].

$$p_2 = p_1 \cdot e^{-\frac{g}{R_d \cdot T_v}(h_2 - h_1)} \quad (2.3)$$

Virtuální teplota představuje teplotu suchého vzduchu, jehož hustota je stejná jako celková hustota vlhkého vzduchu o známé teplotě T a měrné vlhkosti w , a je vypočtena dle vztahu 2.4 [37].

$$T_v = T \cdot (1 + 0,606 \cdot w) \quad (2.4)$$

V reálných podmínkách však atmosféra není tvořena pouze suchým vzduchem, nýbrž také jistým zastoupením vodních par, tudíž se jedná o vzduch vlhký a z pohledu termody-

namických vlastností se jeví jak směs suchého vzduchu a vodních par. Celkový tlak vlhkého vzduchu je vyjádřen vztahem (2.5) [7].

$$p = (\rho_d \cdot R_d + \rho_v \cdot R_v)T \quad (2.5)$$

2.6.1 Metody měření

Nejstarším a velmi přesným nástrojem pro měření tlaku je barometr. V dnešní době ale převládají tlakoměry založené na změně kapacity deskového kondenzátoru, kdy jedna elektroda je pevná a druhá tvoří membránu, na kterou působí atmosférický tlak, případně tlakoměry založené na změně odporu vodiče, kdy tvar vodiče je měněn v závislosti na atmosférickém tlaku.

Rtuťový barometr

Rtuťový staniční barometr je založený na Torricelliho pokusu. Jedná se o systém spojených nádob, přičemž na volný povrch jedné působí tlak zemské atmosféry a na druhý sloupec rtuti, jenž má rozsah několik desítek centimetrů. Výsledný atmosférický tlak se odečte z výšky sloupce rtuti. Dané měření dosahuje velmi přesných výsledků měření, tj. až na desetinu milimetru výšky rtuťového sloupce [14].

Piezorezistivní odporový snímač

Základem piezorezistivního odporového snímače je monokrystalický křemík, jenž je modifikován příměsí stopových prvků tak, že jeho měrný odpor je výrazně závislý na mechanickém namáhání. Na základě injektovaných prvků lze dosáhnout vodivosti typu P či N. Jádrem takového snímače je mechanicky namáhaná destička s modifikovaným křemíkem s velkou rezistivitou. Dané snímače dosahují velké citlivosti při velmi malé velikosti a hmotnosti [3].

Tlustovrstvý tenzometr

Na pohyblivé membráně tlakoměru tvořené většinou z keramiky, Al_2O_3 nebo plastů je umístěn tenzometr, jenž je vyráběn z odporového materiálu ve formě pasty nanesené síťotiskem, která je následně vytvrzená. Tloušťka tenzometru bývá řádově 0,01 mm. Do blízké oblasti membrány na téže desce je možné stejnou metodou vytvořit i kompenzační rezistory [3].

Kapacitní snímač

Měření tlaku s pomocí kapacitního snímače spočívá v pohybu volné elektrody z tenkého vodivého materiálu, která se působením vnějšího tlaku pohybuje mezi dvěma pevně umístěnými elektrodami snímače. Dielektrikum takového snímače bývá vzduch, inertní plyn, silikonový olej, nebo jiná vhodná inertní kapalina. Danou konstrukcí snímače vznikají dva kondenzátory, jejichž kapacita je závislá na vzdálenosti elektrod (tloušťce dielektrika), přičemž oba kondenzátory jsou zapojeny do dvou větví polovičního můstku [3].

2.7 Chemické složení vzduchu

Ačkoli je zemská atmosféra za normálních okolností homogenní, zastoupení jednotlivých plynů není u zemského povrchu vždy stejné v důsledku ovlivnění chemickými a jinými procesy v dané lokalitě. Může se jednat o přirozené procesy, mezi které bychom mohli zařadit fotosyntézu (přeměna oxidu uhličitého na kyslík), erupci sopky (dodání specifických výparů), déšť, který na sebe váže pevné, avšak smáčitelné mikroskopické částice (prachové, pylové, krystaly soli, . . .), nebo třeba hoření, které naopak mimo jiné takové částice uvolňuje. Antropogenní¹ vliv je výrazný, a to především průmyslovou výrobou a spalováním [14]. Složení suchého vzduchu při zemském povrchu (troposféře) je uvedeno v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2: Složení suchého vzduchu v troposféře [9].

Plynná součást	Vzorec	Obsah objemový (%)	Obsah hmotnostní (%)
dusík	N ₂	78,084	75,512
kyslík	O ₂	20,947	23,148
argon	Ar	0,934	1,289
kysličník uhličitý	CO ₂	0,0314	0,0480
neon	Ne	0,001818	0,001636
helium	He	0,000524	0,000072
methan	CH ₄	0,0002	0,00011
krypton	Kr	0,000114	0,000330
kysličník dusný	N ₂ O	0,00005	0,00008
vodík	H ₂	0,00005	0,0000035
xenon	Xe	0,0000087	0,0000397
kysličník siřičitý	SO ₂	0 až 0,0001	0 až 0,0002
ozon (v létě)	O ₃	0 až 0,000007	0 až 0,000012
ozon (v zimě)	O ₃	0 až 0,000002	0 až 0,000003
kysličník dusičitý	NO ₂	0 až 0,000002	0 až 0,000003
amoniak	NH ₃	stopy	stopy
kysličník uhelnatý	CO	stopy	stopy
jod	I ₂	stopy	stopy

Atmosféra nemá shodné složení ani ve vertikálním směru, kdy s narůstající výškou klesá koncentrace dusíku (N₂), Argonu (Ar), kyslíku (O₂) a naopak narůstá zastoupení volného kyslíku (O), hélia (He) a vodíku (H). Přehled složení atmosféry je uveden v tabulce 2.3.

¹Vliv člověka na životní prostředí či změny způsobené přímo nebo nepřímo člověkem.

Tabulka 2.3: Objemové složení atmosféry v závislosti na nadmořské výšce [9].

Sféra	Výška (km)	Dusík	Kyslík		Argon	Helium	Vodík
		N ₂	O ₂	O	Ar	He	H
Troposféra	0	78,1	20,9		0,9	0,0	
Stratosféra							
Mezosféra	80	78,0	19,7	1,7	0,6	0,0	
	100	77,3	15,4	6,7	0,5	0,0	
	120	74,9	13,8	11,0	0,3	0,0	
	200	51,9	5,3	42,7	0,1	0,0	
	300	13,5	0,5	85,8		0,1	
Termosféra	400	5,2	0,1	93,4		1,2	
	500	0,7		92,6		6,7	
	600	0,1		81,5		18,2	0,2
	800			45,4		54,0	0,6
	1 000			23,7		75,1	1,2
	3 000			0,8		44,4	54,8
Exosféra	5 000					17,7	82,2
	10 000					2,7	97,3

2.7.1 Ozonová vrstva

Ozónová vrstva představuje pásmo ve stratosféře, které kromě typického chemického složení obsahuje i nepatrné množství ozonu (O₃), který chrání zemský povrch proti účinkům ultrafialovým paprskům. Vrstva se nachází ve výšce okolo 25–35 km. Kdyby všechen ozon působil na zemský povrch stejným tlakem, jako celá atmosféra, ozonová vrstva by byla vysoká pouze 25 mm [54]. Vrstva samotná neslouží jako štít, nýbrž jsou v ní vhodné podmínky pro štěpení dvouatomových molekul kyslíku na jednotlivé atomy právě za pomoci energie z ultrafialového záření $O_2 \xrightarrow{uv} 2 O$, díky čemuž se částečně spotřebuje. Vysoce reaktivní molekuly kyslíku se váží s jinými dvouatomovými molekulami kyslíku za vzniku tříatomových molekul ozonu $O_2 + O \longrightarrow O_3$. Ozon není stabilní a časem se rozkládá na obyčejný kyslík $2 O_3 \longrightarrow 3 O_2$ [85].

Spektrofotometr

Celkové množství ozonu mezi zemským povrchem a exosférou je možné měřit pomocí Dobsonova spektrofotometru, který měří absorpci slunečního záření v ultrafialové části spektra. Údaje naměřené touto metodou se používají jako referenční hodnoty pro jiné měřicí metody. V dnešní době je Dobsenův spektrofotometr nahrazován Brewerovým spektrofotometrem, který umí měřit kromě celkového množství ozonu a oxidu siřičitého v atmosféře i spektrální intenzitu toku ultrafialového slunečního záření v oblasti UV-B [85].

Kapitola 3

Dostupné platformy pro aerologická měření

V této kapitole jsou popsány profesionální aerologické sondy, ale také platformy pro amatérská měření a zkoumání atmosféry. Přehled významných parametrů profesionálních rádiových sond je shrnut v příloze A.

3.1 Profesionální platformy

Jako profesionální sondu označíme takovou sondu, která je schopna provádět aerologická měření na takové úrovni, aby ji mohly používat i meteorologické úřady pro pravidelná měření. Dané sondy operují ve vyhrazeném rádiovém pásmu pro meteorologii 400, 15–406 MHz s přidělenými konkrétními frekvencemi, aby nedocházelo k nežádoucímu rušení a případné ztrátě naměřených dat. Většinou jsou určeny na jedno použití, ale někteří výrobci deklarují možnost i vícenásobného použití pro snížení nákladů na jednotlivá měření. V České republice je praktikováno jednorázové použití rádiových sond, avšak při měření ozonu v atmosféře je k sondě připevněn, jak je znázorněno na obrázku 3.1, i speciální ozonový snímač [89].



Obrázek 3.1: Vaisala RS92-SGPD vybavená ozonovým snímačem, převzato z [89].

3.1.1 Dropsonde RD41

Jedná se o sondu určenou ke shozu z letadla, která se postupně snáší k zemi na vlastním padáku. Rychlost sestupu je přibližně 21 m s^{-1} ve výšce 12 kilometrů a 11 m s^{-1} při hladině moře. Data odesílá do přijímací jednotky *Airborne Vertical Atmospheric Profiling System* (AVAPS), kterou musí být dané letadlo vybaveno. Sonda měří atmosférický tlak, teplotu a relativní vlhkost s frekvencí 2 Hz, rychlost a směr větru s frekvencí 4 Hz. Je chráněna proti námrazám a slunečnímu záření, jež by mohlo ovlivňovat výsledky měření. Sonda váží 350 g při průměru 70 mm a výšce 41 mm. Doba pádu se odhaduje na 15 minut při shozu z výšky 14 km. Sonda je vyobrazena na obrázku 3.2 [78].



Obrázek 3.2: Dropsonde RD41, převzato z [78].

Tlakové snímání provádí pomocí křemíkového kondenzátoru s rozsahem 0,3–101,3 kPa s přesností 1 kPa. Teplotní snímač je zde v podobě platinového rezistoru, který využívá lineární závislosti rezistivity na teplotě na daném rozsahu, který v tomto případě činí -90 až $+60$ °C s přesností 0,01 °C. Vlhkost je snímána pomocí kondenzátoru z tenké fólie v plném rozsahu, tj. 0–100 %, přičemž odchylka měření je pod 0,1 % [78].

3.1.2 Radiosonde RS41-SGP

Vyznačuje se malou vahou 84 g a rovněž i malými rozměry: $155 \times 63 \times 46$ mm, případně $282 \times 63 \times 104$ mm se vztyčeným výložníkem se senzory. Díky svým malým rozměrům a bílé barvě přijímá velmi malé množství solárního záření. Je vybavena efektivní ochranou před namrzáním, a to odporovým drátem, který je v blízkosti vybraných snímačů. Všechny senzory jsou kalibrovány proti referenčním hodnotám. Sonda vysílá naměřená data s frekvencí 1 Hz až do vzdálenosti 350 km a disponuje rozhraním pro připojení externího senzoru, kupříkladu *OIF411* pro měření ozonu. Sonda *RS41-SGP* je vyobrazena na obrázku 3.3 [79].

Tlakové snímání provádí pomocí křemíkového kondenzátoru s rozsahem 0,3–101,3 kPa s přesností 1 kPa. K měření teploty využívá platinový rezistor s teplotním rozsahem -95 až $+60$ °C s přesností 0,01 °C. Stabilita senzoru s postupem času klesá, kdy po jednom roce je přesnost pod 0,05 °C, po třech letech pod 0,1 °C. Vlhkost je snímána pomocí kondenzátoru z tenké fólie v plném rozsahu, tj. 0–100 %, přičemž odchylka měření je pod 0,1 %. Rychlost větru je schopna určit s přesností $0,1 \text{ m s}^{-1}$, přičemž maximální měřitelná rychlost je 180 m s^{-1} . Směr větru je schopna určit v plném kruhovém rozsahu s přesností $0,1^\circ$ [79].



Obrázek 3.3: Radiosonde RS41-SGP, převzato z [79].

3.1.3 iMet-4 Radiosonde

iMet je malá radiosonda o rozměrech $139 \times 67 \times 31$ mm ($235 \times 67 \times 31$ mm s výložníkem) o hmotnosti 120 g. Využívá lithiovou baterii, přičemž udávaná minimální doba fungování je 135 minut. Příjem GNSS dat zajišťuje *U-Blox CAM-M8* přijímač. Naměřená data vysílá s volitelným výkonem 30–500 mW s modulací GFSK s přenosovou rychlostí 1 200 baudů, díky které je minimální dosah 250 km [31].



Obrázek 3.4: iMet-4 Radiosonde, převzato z [31].

Atmosférický tlak je vypočítáván z výšky získané z dat GPS v kombinaci s naměřenou teplotou a vlhkostí vzduchu. Avšak sonda je vybavena i standardním tlakoměrem, který je používán do určité, optimální výšky. Standardní tlakoměr měří v rozsahu 10–1 200 hPa s rozlišením 0,01 hPa a odezvou 0,05 ms. Teplotu vzduchu měří v rozsahu -90 °C až do $+60$ °C pomocí malého skleněného termistoru, díky jehož malé velikosti je minimalizován efekt záření a je zajištěna rychlá odezva, která činí v klidném vzduchu 2 sekundy. Rozlišení naměřené hodnoty je 0,01 °C. Snímač pro měření relativní vlhkosti vzduchu je tvořen

tenkovrstvým kapacitním polymerem, který přímo reaguje na relativní vlhkost. Rozlišení naměřené hodnoty je 0,01 %RH. Odezva při pokojové teplotě je 0,6 sekundy, při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až 61 sekund. Směr a rychlost větru jsou vypočítávány rovněž z dat GPS, kdy rozlišení rychlosti dosahuje $0,1\text{ m s}^{-1}$ a rozlišení směru větru 1° [31].

3.1.4 GRAW - DFM-09

Velmi lehká sonda, přičemž dle dostupných informací uvádí, že se jedná o nejmenší a nejlhčí rádiovou sondu na dnešním trhu, přičemž váží 90 g s rozměry $200 \times 42 \times 60\text{ mm}$. Disponuje výložníkem, na kterém jsou situovány snímače pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Sondu pohání lithiová baterie. Vysílá v pásmu 400,15–406 MHz díky vestavěnému syntetizátoru frekvence. Data jsou modulována pomocí FSK modulace [18].



Obrázek 3.5: GRAW - DFM-09 – Radiosonde Systems, převzato z [18].

Tlak je měřen s přesností menší než $0,3\text{ hPa}$. Teplotní keramický snímač měří s rozlišením $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesností menší než $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, který díky malé hmotnosti zajišťuje rychlou odezvu a malou tepelnou kapacitu. Snímač relativní vlhkosti vzduchu měří s rozlišením 1 %RH a přesností menší než 5 %RH. Je tvořen kapacitním polymerem. Pro rychlost větru je udávaná přesnost menší než $0,2\text{ m s}^{-1}$. Je vybavena standardním GPS přijímačem, jehož data se zasílají pozemní stanici, která je taktéž vybavena přijímačem GPS, která na jejich základě provede korekci dat [18].

3.1.5 SRS-C34 - Radiosonde

Opakovaně použitelná rádiová sonda. Měřicí systém nutně zahrnuje i pozemní stanici *ARGUS37*, se kterou komunikuje digitálně. Jedná se o větší sondu o rozměrech $350 \times 210 \times 100\text{ mm}$ při hmotnosti 620 g. Rovněž vysílá v pásmu 400,15–406 MHz s využitím AFSK modulace s přenosovou rychlostí 2 400 baudů. Sondu je možné dovybavit speciálním snímači, kterými lze měřit množství ozónu či aerosolů [39].

K měření atmosférického tlaku je využit *hypsometr* vyvinutý společností *Meteolabor*, který neměří tlak obvyklým způsobem, kdy se měří deformace membrány, nýbrž je založen na fyzikálním zákoně, kdy sleduje teplotu vroucí vody. Díky tomu má rozsah měření 0–35 km ($5\text{--}1\text{ }100\text{ hPa}$). Dosahuje přesnosti 0,2 % při rozlišení $0,1\text{ hPa}$ a časové odezvě pod 1 sekundu. Měření teploty vzduchu je zajištěno teploměrem o průměru $0,1\text{ mm}$, tudíž je minimalizován účinek radiačního záření. Jeho měřicí rozsah činí $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozlišením $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ při odezvě pod 1,5 sekundy při tlaku 10 hPa . Umožňuje měřit relativní vlhkost vzduchu třemi různými snímači, a to pomocí hygristoru, polymerního kapacitního snímače a pro velmi přesná měření snímačem *SnowWhite*[®], který je zároveň jediný komerčně vyráběný snímač, který přímo reflektuje rosný bod a je použitelný



Obrázek 3.6: SRS-C34 - radiosonde, převzato z [39].

na rádiových sondách. Rychlost a směr větru jsou přepočítávány z GPS dat, kdy přesnost rychlosti větru je $0,01 \text{ m s}^{-1}$ při rozlišení $0,12 \text{ m s}^{-1}$, kdy přesnost směru větru dosahuje 2° při rozlišení $0,1^\circ$ [39].

3.2 Amatérské platformy

Nejedná se přímo o rádiové sondy určené k profesionálnímu pravidelnému aerologickému měření, ale o demonstrátory, univerzální platformy vybavené komunikačními moduly pro příjem GNSS dat a odesílání dat v ISM pásmech tak, aby si je uživatel mohl osadit takovými snímači, které uzná za vhodné, případně i kamerou dle možností jednotlivých platforem. Jejich velkou nevýhodou je však pořizovací cena.

Využívání amatérských sond ke zkoumání atmosféry pomocí meteorologických balónů se označuje anglickým termínem *High Altitude Ballooning* (HAB). Systém realizující takovéto měření se většinou skládá z mini-počítače nebo mikrokontroléru, GNSS přijímače pro získávání dat o poloze, rádiový nebo GSM modul pro odesílání dat, případně úložiště pro uchovávání naměřených dat.

3.2.1 Pi In The Sky

Pi In The Sky je nejpoblárnější platforma pro výškové lety založená na kompaktním počítači *Raspberry Pi*. Pro starší verze počítačů *Raspberry Pi* model A+, B+, V2B je dostupný modul *PITS+* zobrazený na obrázku 3.7. Verze *PITS* pro velmi kompaktní počítač *Raspberry Pi Zero* je zobrazena na obrázku 3.8.

Jsou vybaveny vestavěným napájecím regulátorem, jenž dokáže zabezpečit chod sondy na 20 hodin ze 4 baterií typu AA. Využívají U-Blox přijímač pro příjem GNSS dat, který poskytuje údaje až do výšky 50 km. Pro vysílání naměřených dat je použit teplotně kompenzovaný vysílač *Radiometrix MTX2* s pracovní frekvencí 434 MHz, který operuje v bezlicenčním pásmu pro Evropu. Díky napojení na *Raspberry Pi* počítač, je možné připojit kameru přímo do daného počítače [46].



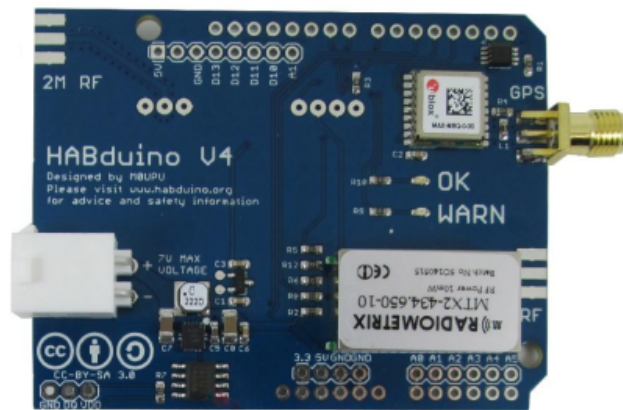
Obrázek 3.7: PITS+ modul pro počítače *Raspberry Pi* verzí A+, B+, V2 B, převzato z [46].



Obrázek 3.8: PITS+ modul pro počítače *Raspberry Pi* verzi Zero, převzato z [46].

3.2.2 HABduino

Velmi podobným projektem využívajícím externí výpočetní jednotku je *HABduino*, který je tvořen rozšiřujícím modulem pro *Arduino UNO*. Stejně jako *Pi In The Sky*, je vybaven GNSS přijímačem *U-Blox MAX M8Q* a rádiovým vysílačem *Radiometrix MTX2* [19].



Obrázek 3.9: HABduino modul pro *Arduino*, převzato z [19].

Kapitola 4

Koncept vestavěného systému pro provádění aerologických měření

V této kapitole je popsán rozbor možné platformy schopné provádět aerologická měření, přičemž je kladen důraz na různá omezení, ať již technická nebo legislativní, jež taková platforma musí splňovat. Z podstaty aerologického měření je nanejvýše vhodné, aby měřicí platforma byla navržena jako vestavěný systém, tj. zařízení, které je schopno provádět svou činnost s minimálním zásahem člověka (operátora), a to především z důvodu možné četnosti provádění těchto měření, a v neposlední řadě z ekonomické stránky věci. Zároveň je nutné vzít na vědomí, že operátor nemůže být fyzicky v kontaktu se sondou během měření z důvodu ovlivňování měřených veličin a také faktu, že jeho přítomnost by byla značně problematická. Operátor by ovšem mohl kontrolovat sondu pomocí bezdrátového spojení, které by muselo být spolehlivé.

4.1 Vlastnosti platformy

Zásadní vliv na definici parametrů platformy má požadavek opakovatelnosti měření. Při jednorázovém použití při přihlédnutí k ekonomickému aspektu pozbývá významu platformu osazovat drahými a přesnými přístroji a speciálními snímači, které by měřily nestandardní veličiny, pokud by to nebylo přímo účelem mise sondy. Jelikož cílem této práce je navrhnout a vytvořit vestavěný systém pro aerologická měření, bude v následujícím textu uvažován takový systém, který by byl schopen provádět základní aerologická měření zahrnující teplotu a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, rychlost a směr větru.

Cílem měření platformy je dosažení schopnosti správně fungovat ve všech predikovatelných podmínkách, které mohou nastat během jejího provozu. Z pohledu prostředí je to velký teplotní rozsah $-56,5^{\circ}\text{C}$ až $+50^{\circ}\text{C}$, kdy sonda musí spolehlivě měřit za teplých letních dnů, a zároveň v mrazivé svrchní části troposféry. Dále se jeví vhodnější, aby platforma byla schopna se vypořádat se vzdušnou vlhkostí v kombinaci se zápornými hodnotami teploty, kdy by mohla na jejím povrchu vznikat námraza, která by jistým způsobem mohla ovlivňovat výsledky měření, a v neposlední řadě i pohyblivost celé platformy. Uvážení tohoto problému nemusí mít řešení, neboť technika pro odstranění námrazy v podobě generování tepla by měla za následek výrazné zkreslení měřených veličin, přičemž by bylo nutné zajistit jeho zdroj.

4.1.1 Pohyb

Pro realizaci aerologických měření v různých vrstvách atmosféry, je nutné, aby se do nich senzorická platforma dostala vlastní silou nebo s využitím jiného prostředku. Nabízí se vlastní meteorologický balón nebo vynesení platformy do požadované výšky dopravním prostředkem, ať už nosnou raketou, dronem, nebo letadlem. Ve všech případech je však na uvážení vybavit platformu zpomalovacím zařízením (padákem), který při přiblížení k zemskému povrchu zmírňuje případné škody na majetku, případně eliminuje ohrožení na zdraví. Jelikož pohyb volného objektu v atmosféře je závislý na povětrnostních podmínkách, nelze zaručit, že bude správně odhadnuto místo dopadu, a že se opět shledáme s vyslanou sondou.

Meteorologický balón

Meteorologické stanice využívají k dopravení aerologických sond do požadované výšky balón plněný plynem, jenž je lehčí než vzduch. Tímto je zabezpečeno plynulé stoupání až do takové výšky, kdy se plyn v balónu roztáhne díky postupnému snižování tlaku okolní atmosféry do rozměrů, při kterých je překročena maximální roztažnost balónu a následně dochází k jeho prasknutí. V meteorologických balónech jsou použitelnými plyny především [38]:

- vodík — nosnost $1,14 \text{ kg m}^{-3}$, má nejlepší poměr nosnosti ke svému objemu, hrozí riziko výbuchu,
- hélium — nosnost $1,05 \text{ kg m}^{-3}$, v porovnání s ostatními možnostmi drahé,
- svítiplyn — nosnost $0,63 \text{ kg m}^{-3}$, hrozí riziko výbuchu,
- horký vzduch — nosnost $0,17\text{--}0,23 \text{ kg m}^{-3}$, levné řešení, ale ne tolik účinné. Využívá se u horkovzdušných balónů. V našem případě by bylo možné jej zahřívat odporovým drátem.

V České republice jsou na obou meteorologických stanicích, která provádějí aerologická měření (Praha-Libuš a Prostějov), využívány meteorologické balóny plněné vodíkem s předpokládanou výškou sondáže 30 km [5].

4.1.2 Snímače

Nejdůležitějšími parametry u měřicího systému jsou především charakteristiky snímačů. Z tohoto pohledu je třeba snímače vybírat s vhodným měřicím rozsahem, požadovanou teplotní odolností a stálostí a také s vhodnou snímací frekvencí. Energetická náročnost použitelných snímačů by měla rozsahově spadat řádově do oblasti stovek μA až několik jednotek mA tak, aby nevznikala nutnost vybavit platformu akumulátorem o velké kapacitě, který by neúměrně zvyšoval hmotnost sondy, a v konečném důsledku i potřebnou nosnost platformy.

Důležitým prvkem je vybavení sondy systémem pro určování polohy, například některým z *Globálních družicových polohových systémů* (GNSS), aby bylo možné naměřené výsledky vztáhnout k určité poloze, aby byla sonda schopna určit svoji výšku i jiným způsobem než je atmosférický tlak, neboť ten se v důsledku proudění větrů může měnit a vypočtená výška sondy na základě údajů z tlakoměru při uvážení Standardní atmosféry by nebyla korektní.

Mimo věnování úsilí při výběru vhodných snímačů je rovněž velmi důležité věnovat zvýšenou pozornost jejich umístění na sondě, aby byly vhodně vystaveny měřeným veličinám a zároveň byly co nejméně ovlivněny jednotlivými prvky systému.

Kalibrace

Pro ověření charakteristik snímačů deklarovaných výrobcí v podkladové dokumentaci jsou snímače kalibrovány již v průběhu výroby. Stárnutím materiálů a jinými vnějšími vlivy dochází v průběhu životního cyklu snímače k odchylkám měření vůči reálným hodnotám. V takovém případě je nutné provést novou kalibraci v certifikovaných kalibračních laboratořích, které disponují přesnými zařízeními pro simulaci uvažovaných veličin, případně etalony umožňující měření referenčních hodnot daných veličin vůči naměřeným hodnotám kalibrovaného snímače. Výsledkem měření je seznam odchylek (dvojic), jež vyjadřují rozdíly naměřených hodnot vůči hodnotám referenčním.

V České republice zajišťuje kalibraci a ověřování *Český Metrologický Institut*¹ (ČMI), který dohlíží na jednotnost a přesnost měřidel a měření ve všech oborech vědecké, technické a hospodářské činnosti [30].

4.2 Legislativní požadavky

Prostor nad zemským povrchem sdílí spektrum subjektů s různými zájmy, a proto při provádění aerologických měření až za hranici troposféry je nutné tyto subjekty respektovat. V České republice platí normy a předpisy vydávané *Úřadem pro civilní letectví* (ÚCL), které určují, kdy a za jakých podmínek je možné využívat vzdušný prostor společně s ostatními subjekty. Vzhledem k tomu, že Česká republika je členem Evropské unie, musí implementovat a vyžadovat dodržování předpisů vydávaných *Evropskou agenturou pro bezpečnost letectví* (EASA). Vycházejíc z požadavku na aktuálnost měřených dat komunikují aerologické sondy s pozemním přijímacím systémem pomocí rádiových vln. Z toho plyne nutnost vzít v úvahu omezení pro daný druh komunikace. Na území České republiky řídí rozdělování rádiového spektra *Český telekomunikační úřad* (ČTÚ), který spolupracuje s *Evropským ústavem pro telekomunikační normy* (ETSI) určujícím standardy na území celé Evropské unie.

4.2.1 Volný pohyb

Z uvedených možností dopravy sondy pro aerologická měření do vyšších vrstev atmosféry popsanych v sekci 4.1.1 se jeví jako nejvhodnější řešení použití balónu. Samotný provoz balónu se musí řídit předpisem L2 pro pravidla létání, a to především dodatkem 5 *Volné balóny bez pilota na palubě se zátěží* a doplňkem R - *Podmínky pro provoz balónů bez pilota na palubě*. Dané předpisy klasifikují balóny a jejich užitečné zátěže (v našem případě aerologickou sondu) do několika kategorií, přičemž pro každou kategorii jsou vyžadovány různé podmínky a požadavky pro uskutečnění letu [88].

Dle váhy užitečné zátěže se balóny klasifikují jako lehké, střední a těžké. Od váhy užitečné zátěže se ovšem odvíjí i minimální nosnost balónu, který pro těžší náklady musí obsahovat větší množství nosného plynu, a tudíž i jeho objem je vyšší. Z tohoto aspektu se balóny bez pilota na palubě dělí do tříd B1–B6 [88].

4.2.2 Rádiová komunikace

Česká norma pro regulaci rádiové komunikace pro využití v meteorologii ČSN EN 302 054 přebírá v plném rozsahu evropský standard ETSI EN 302 054. Dle normy pro

¹<https://www.cmi.cz>

meteorologické sondy je vyhrazené pásmo 400,15–406 MHz při maximálním vyzařovaném výkonu 200 mW [90].

4.2.3 Maximální výška

Ze studie dostupné literatury není známé nařízení, které by omezovalo maximální výšku letu aerologické sondy. Existuje ovšem omezení všeobecně známé pod označením *CoCom limits*, které zavazuje výrobce jednotlivých členských států implementovat omezení v GNSS přijímačích tak, aby při překročení rychlosti $1\,900\text{ km h}^{-1}$ při nadmořské výšce větší než 18 km přestaly poskytovat trasovací údaje [1]. Někteří výrobci u svých produktů však tyto hranice nespojují logickým operátorem *a*, nýbrž logickým operátorem *nebo*, což nese za následek ztrátu cenných údajů při pouštění aerologických sond do výškové hladiny nad 18 km. Bohužel oficiální informace, jakým způsobem jednotlivé společnosti dané podmínky implementují, schází, a proto je nutné se spolehnout především na experimenty s jednotlivými přijímači.

4.3 Koncept platformy

Cílem platformy je poskytování měřených dat v reálném čase. Z dostupných architektur se jako vhodná jeví koncepce obsahující sondu, která by prováděla samotná měření, a stanici, která by dané naměřené hodnoty od sondy přijímala a dále je zpracovávala či přeposílala v určitém formátu dále. V opačném případě by je mohla aerologická sonda zaznamenávat do interního úložiště, ze kterého by se po jejím pádu a následné lokalizaci naměřená data přečetla, tj. sonda by se připojila k počítači a data by byla stažena. Tato metoda by však implikovala opětovné shledání se se sondou, kterou může vítr zanést velmi daleko a bez naměřených dat bychom jen obtížně odhadovali místo jejího dopadu.

Komunikace mezi sondou a stanicí je žádoucí realizovat pomocí rádiové komunikace dle normy ČSN ETSI EN 302 054, tj. v pásmu 400,15–406 MHz při maximálním vyzařovaném výkonu 200 mW. Světelná komunikace by byla vzhledem k možným očekávatelným oblačnostem nerealizovatelná.

4.3.1 Sonda

Stěžejními prvky aerologické sondy jsou její snímače, které by měly dosahovat vhodné přesnosti za očekávatelných provozních podmínek. Na druhou stranu přesnost snímačů není jediným kritériem při jejich výběru, neboť například jejich nadměrná váha by měla negativní provozní vlivy. Jak již bylo zmíněno, s vyšší hmotností sondy je potřebný větší balón a tím postupně dochází ke změně jeho kvalifikace. Uvedené má za následek komplexnější podmínky pro získání povolení k letu. Současně je také nutné zvážit i další systémové prvky, kterými jsou přiměřeně rozměrný padák a dostatečně měkký kryt sondy minimalizující riziko újmy na zdraví osob nebo poškození cizího majetku při dopadu sondy.

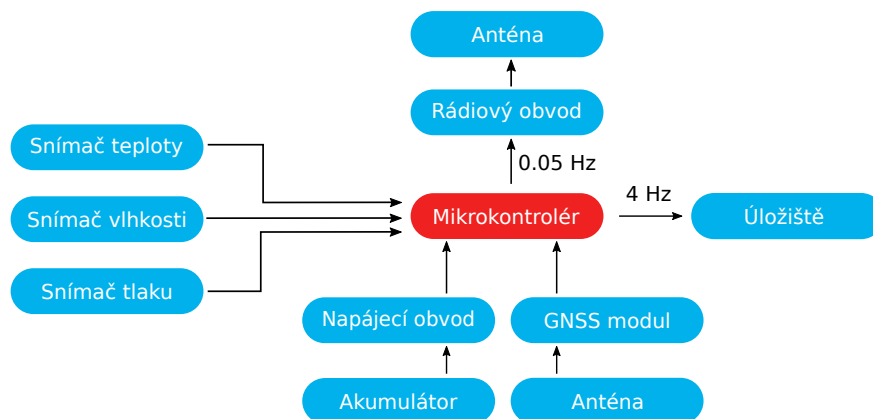
Mezi snímači by rozhodně neměly chybět přístroje pro měření teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu. Dále je nezbytné, aby byla aerologická sonda vybavena GNSS přijímačem, který umožní určení polohy, ke které se váží naměřená data. Z veličin poskytovaných GNSS přijímačem je možné určit rychlost a směr větru. Vybavit sondu snímači pro speciální veličiny, mezi které bychom mohli zařadit kupříkladu podíl ozonu ve vzduchu, intenzitu infračerveného záření, míru radioaktivity a další, se jeví jako nepraktické.

Výsledná sonda by měla být tvořena jednou deskou plošného spoje, která bude osazena potřebnými snímači, případně rozhraními pro dané snímače, mikrokontrolérem (MCU), který by zajišťoval pravidelný sběr dat ze snímačů, modulem GNSS, rádiovým modulem a napájecím obvodem. Zdroj napájení bude tvořit baterie s dostatečnou kapacitou pro provádění měření minimálně v délce předpokládané doby trvání mise. Jak modul GNSS, tak i rádiový modul vyžadují specifické antény, ať již pasivní či aktivní, které pro svůj provoz vyžadují externí napájení. Tyto antény mají zásadní vliv na fungování celé platformy. Bez GNSS dat by sonda nevěděla, kde se právě nachází, a bez výkoného vysílání zpráv pomocí rádiové komunikace směrem k pozemní stanicí by je ani nemohla předat.

Rádiová komunikace je na velké vzdálenosti výrazně ovlivněna šumem. Proto je vhodné vysílat měřená data na velmi malé přenosové rychlosti (řádově několik desítek až nízké stovky baudů) s omezením vzorkovací frekvence. Jako koncepčně koncepčně nevhodné se jeví sondu složením z přesných snímačů a dalšího drahého vybavení, které vysílá data na malé frekvenci v důsledku omezení rádiové komunikace. Proto se naskýtá myšlenka osazení sondy externím úložištěm dat, kupříkladu microSD kartou, do kterého by se v průběhu mise zapisovala měření na vyšší frekvenci, řádově jednotky Hz. Výhodou microSD karty je, že ji lze v případě úspěšného nalezení sondy po skončení mise jednoduše připojit k počítači, a pohodlně vyčíst naměřená data bez nutnosti speciálního hardware či znalosti interního fungování sondy. Z tohoto důvodu se jeví nepraktické měřená data ukládat do interní flash paměti mikrokontroléru.

Celou sondu je vhodné umístit do na míru vytvořené polystyrenového boxu, který by uložené komponenty chránil před mrazivým okolním prostředím a zároveň by pohltil část kinetické energie při dopadu sondy na zem.

Schéma výsledného konceptu sondy je na obrázku 4.1.



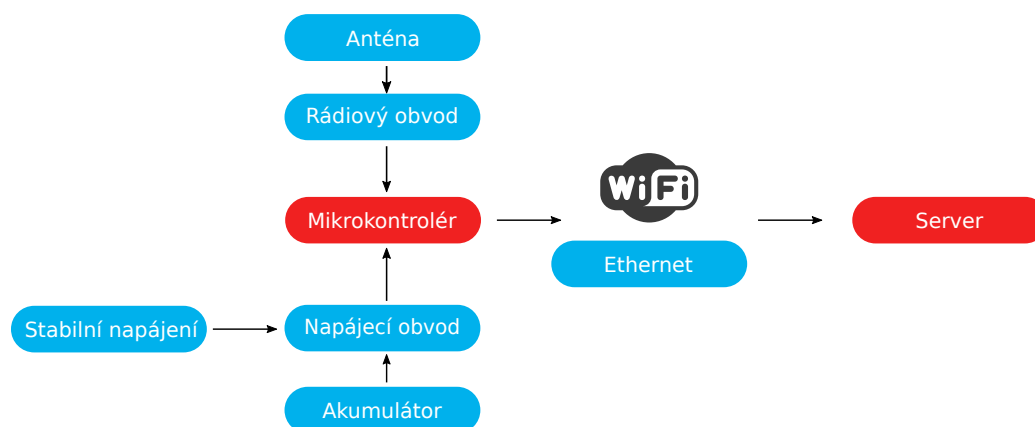
Obrázek 4.1: Schéma konceptu sondy.

Z praktického hlediska je vhodné zvolit metodu výstupu pomocí meteorologického balónu, který eliminuje nutnost disponovat letadlem se schopností dopravit sondu do požadované výšky. Balón je možné vypouštět i za zhoršených meteorologických/letových podmínek při kterých pilotované letadlo nemuselo dostat povolení ke vzletu. Dalším důvodem pro zvolení stoupavého scénáře měření je skutečnost, že místem měření je Česká republika, která je vnitrozemský stát s bezproblémovým startem balónu z kteréhokoli místa s výjimkou vojenských objektů, letišť a dalších oblastí, jež podléhají speciálním omezením. Pokud bychom chtěli předpovídat počasí přímořských států, bylo by nutné provádět měření i daleko na

moři od pobřeží, kde by se s výhodou používal scénář klesajícího měření, neboť lodní doprava není natolik rychlá jako letecká, aby bylo možné v rozumném čase vypustit (shodit) sondy na požadovaných místech. Za nosný plyn balónové jednotky aerologické sondy je vhodné zvolit nevybušný plyn, typicky hélium, i za cenu snížené účinnosti. Balóny plněné výbušným vodíkem musí být schváleny ÚCL, který nemusí udělit povolení k letu, a tím by se celá mise mohla ohrozit.

4.3.2 Pozemní stanice

Hlavní úlohou pozemní stanice je přijímat naměřená data z aerologické sondy. Proto musí být vybavena dostatečně citlivou přijímací anténou. Ačkoli by mohla sloužit i jako primární úložiště a databáze naměřených dat, tento model by nebyl příliš vhodný, jelikož při využití vícero stanic by každá stanice mohla obsahovat jen část naměřených dat. Z tohoto důvodu je vhodné koncipovat stanici jen jako přijímač a vyrovnávací paměť naměřených dat, který je případně ve správném formátu zašle do centrálního serveru s databází časových řad pro jednotlivé naměřené stavové veličiny atmosféry. Proto je nutné, aby stanice disponovala rozhraním pro připojení k internetu, ideálně jak bezdrátovým rozhraním Wi-Fi, tak i drátovým Ethernetem pro vyšší univerzálnost. K napájení stanice je možné využít stabilního napájení ze sítě 230 V střídavých s využitím transformátoru pro snížení napětí, případně i z baterie. S ohledem na možnost ztráty dat při výpadku napájení stanice je vhodné zahrnout oba způsoby napájení. Z důvodu průchodu dat stanicí, nikoli uložením, pozbývá významu stanici vybavovat sofistikovanějším uživatelským rozhraním, než je stav napájení, počet sond v dosahu a případné indikace, pomocí níž by byla signalizována nedostupnost serveru. Schéma konceptu staniční části je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Schéma konceptu stanice.

4.4 Určování polohy sondy

K určování polohy sondy bude využit dostupný globální družicový polohový systémů GNSS. Nejedná se o určování polohy přímým měřením, kdy se poloha stanovuje měřením od referenčních bodů, nýbrž o určování polohy nepřímým měřením, kdy je poloha stanovena

na základě měření jiných veličin. Nejčastěji se používají metody založené na úhломěrném měření, dálkoměrném měření, nebo na jejich kombinaci [51].

Úhломěrné měření spočívá v určení azimutů k minimálně dvěma bodům o známé poloze, přičemž při zaznačení těchto azimutů do mapy v podobě přímek vznikne jejich průsečík, který odpovídá poloze, ze které bylo prováděno měření.

Určování polohy pomocí dálkoměrného měření je založeno na měření vzdáleností od více jak tří bodů o známé poloze, kdy vyznačením naměřených vzdáleností od jednotlivých bodů do mapy ve formě kružnic vytvoří právě jeden průsečík všech kružnic, který odpovídá poloze, ze které bylo prováděno měření. V případě určování vzdáleností pouze od dvou známých bodů by vznikly průsečíky dva (pokud zanedbáme případ, kdy by poloha prováděného měření ležela přímo na přímce mezi danými známými body, kdy by vznikl právě jeden průsečík), a tudíž by bylo nutné na základě dodatečných informací určit, který bod odpovídá původní poloze měření. V trojrozměrném prostoru za ideálních podmínek pro určení polohy rovněž stačí vědět vzdálenosti od 3 definovaných bodů o známé poloze.

Vzhledem k tomu, že dálkoměrné měření nevyužívá k měření přímo vzdálenost, je tuto veličinu potřebné dopočítat na základě vhodných fyzikálních principů. Označíme-li známé body za majáky, které v ideálním případě v přesně stanovených časových intervalech synchronizovaně vysílají všesměrový signál (akustický, optický, elektromagnetický, ...), a změříme-li přesně intervaly od vyslání signálu až po jeho detekování, vypočítáme vzdálenost z rychlosti šíření signálu v daném prostředí a doby letu signálu dle vztahu (4.1) [9].

$$s = v \cdot t_s \quad (4.1)$$

4.4.1 Globální družicový polohový systém

Globální družicový polohový systém je uskupením umělých družic (radiomajáky) pohybujících se na přesně definovaných drahách, které nepřetržitě periodicky vysílají směrem k Zemi rádiové signály. Dle způsobu komunikace mezi družicemi a přijímačem lze systémy dělit na:

- aktivní — obousměrná komunikace, řídicí stanice prostřednictvím navigačních družic vyšle identifikátor konkrétního přijímače, který na základě tohoto signálu vyšle svoji zprávu, která je prostřednictvím navigačních družic přeposlána do řídicí stanice, která na jejichž základě a dle různých časových razítek u daných zpráv určí polohu přijímače,
- pasivní — jednosměrná komunikace, zprávy vysílané z družic obsahují spolu s časovými značkami i údaje o oběžných drahách daných družic.

Je zřejmé, že aktivní systém je vhodný pouze pro omezený počet přijímačů, aby nedošlo k přetížení systému. V obou případech je známa poloha družic, avšak významným rozdílem je zařízení, ve kterém se dané signály vyhodnocují, kdy pasivní systémy, na rozdíl od aktivních, přenechávají vyhodnocení na přijímačích (uživatelských zařízeních), a díky tomu má takový systém neomezenou kapacitu přijímačů. Výsledná poloha měření je řešením soustavy tří rovnic o třech neznámých (4.2) pro případ obdržení signálů od tří družic [51].

$$t_{d1} \cdot c = \sqrt{(X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2 + (Z - z_1)^2} \quad (4.2a)$$

$$t_{d2} \cdot c = \sqrt{(X - x_2)^2 + (Y - y_2)^2 + (Z - z_2)^2} \quad (4.2b)$$

$$t_{d3} \cdot c = \sqrt{(X - x_3)^2 + (Y - y_3)^2 + (Z - z_3)^2} \quad (4.2c)$$

Aby výsledkem daného výpočtu byla relevantní data, musel by mít přijímač synchronizované hodiny se systémovým časem družicového navigačního systému, což je v reálných podmínkách těžko dosažitelné, a tudíž vzniká rozdíl měřeného času Δt . Proto při řešení soustavy rovnic (4.2) uvažujeme pouze zdánlivé vzdálenosti přijímače od daných družic, namísto reálných vzdáleností. Pro přesné určení vzdálenosti je nutné znát i časový posun hodin Δt družicového systému a přijímače. Tím nám vzniká čtvrtá neznámá v soustavě rovnic, a proto je nutné pro její vyřešení k již zmíněným rovnicím (4.2) přidat další rovnici reprezentující čtvrtou družici (4.3) [51].

$$r_1 = \sqrt{(X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2 + (Z - z_1)^2} - c \cdot \Delta t \quad (4.3a)$$

$$r_2 = \sqrt{(X - x_2)^2 + (Y - y_2)^2 + (Z - z_2)^2} - c \cdot \Delta t \quad (4.3b)$$

$$r_3 = \sqrt{(X - x_3)^2 + (Y - y_3)^2 + (Z - z_3)^2} - c \cdot \Delta t \quad (4.3c)$$

$$r_4 = \sqrt{(X - x_4)^2 + (Y - y_4)^2 + (Z - z_4)^2} - c \cdot \Delta t \quad (4.3d)$$

V dnešní době jsou civilním uživatelům volně k dispozici družicové vojenské systémy Spojených států amerických GPS a Ruské federace GLONASS, ale také navigační systémy BeiDou pod záštitou Čínské lidové republiky a Galileo financovaný Evropskou unií prostřednictvím Evropské kosmické agentury [51].

GPS

Globální polohový systém (GPS) byl vyvinut a je i v dnešních dnech spravován ministerstvem obrany USA. Vyznačuje se relativně velmi vysokou polohovou přesností od desítek metrů až po milimetry, schopností určovat rychlost a čas s přesností odpovídající přesnosti polohové, dostupností signálu kdekoli na zemském povrchu, nepřetržitým provozem a schopností určovat polohu v trojrozměrném prostoru. Standardní polohová služba GPS je běžným uživatelům dostupná bez omezení a bez licenčních poplatků. Obvykle GPS zahrnuje 21 navigačních družic v ostrém provozu, 3 aktivní družice v záloze na orbitě, a dále 4 družice v pohotovostním režimu připravené na start ze Země do 48 hodin. Oběžné dráhy jsou konstantní vůči Zemi s dobou obletu 11 hodin a 58 minut. Družice se pohybují celkem po 6 kruhových drahách se 4 družicemi na každé z nich, přičemž sklon oběžné dráhy je přibližně 55° vůči rovníku. Dané uspořádání drah a počet družic na nich garantuje dostupnost signálů alespoň od 4 družic kdekoli na Zemi v jakémkoli čase [51].

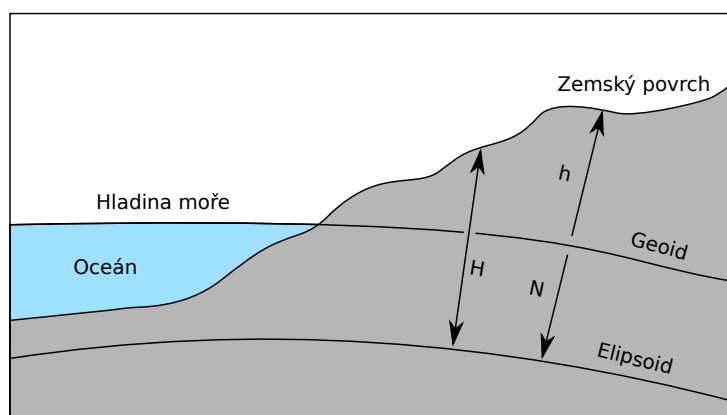
GLONASS

Globální navigační satelitní systém (GLONASS) je spravován Ruskými kosmickými silami pro potřeby Ruské federace, přičemž stejně jako GPS, je dostupný i civilistům. Jedná se o pasivní dálkoměrný družicový rádiový navigační systém k určování času, a dále k určování polohy a rychlosti v trojrozměrném prostoru. Úplná konstelace 24 družic obíhá Zemi na třech kruhových drahách vzájemně posunutých o 120° , přičemž na každé dráze je rovnoměrně rozloženo 8 družic po 45° . Oběžné dráhy jsou ve výšce 19 100 km s dobou obletu 11 hodin a 15 minut, přičemž sklon drah je $64,8^\circ$. Daná konstelace garantuje minimální viditelnost 6 družic kdykoli a kdekoli na Zemi [51].

4.4.2 Souřadnicový systém

Pro určování polohy na Zemi je potřeba nejdříve definovat model, ke kterému se poloha bude vztahovat, neboť zemský povrch je velmi nepravidelný a pro přímé určování polohy je těžko použitelný. Mezi nejpoužívanějšími jsou *Geoid* a *Referenční elipsoid*. Jejich vizualizace v kontextu s povrchem Země je uvedena na obrázku 4.3.

- Geoid – reprezentuje model povrchu Země při střední hladině světových oceánů.
- Referenční elipsoid – model běžně používaný v geodézii a v navigaci. Je definován standardem *Světového geodetického systému 1984* (WGS84) [51].



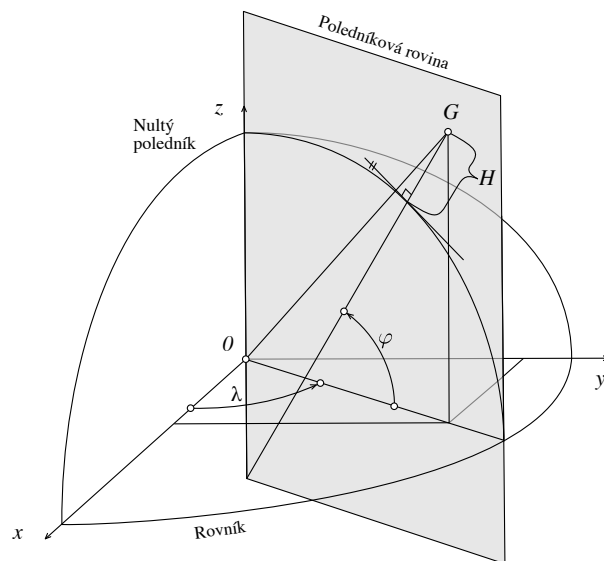
Obrázek 4.3: Srovnání modelů zemského povrchu.

Pro navigaci se běžně používá WGS84, podle něhož je poloha definována třemi údaji, a to zeměpisnou délkou, zeměpisnou šířkou a geodetickou výškou.

- Zeměpisná délka λ — měří se v rovníkové rovině, udává úhel mezi nulovým poledníkem (Greenwich) a bodem zájmu v rozsahu $\lambda = \pm 180^\circ$. Nulový poledník dělí elipsoid na západní a východní délku.
- Zeměpisná šířka ψ — měří se v poledníkové rovině, udává úhel mezi rovníkem a bodem zájmu v rozsahu $\psi = \pm 90^\circ$. Rovník dělí elipsoid na severní a jižní šířku.
- Geodetická výška H — výška nad elipsoidem WGS84, měří se na lokální normále.
- Nadmořská výška h — vychází z výšky nad referenčním elipsoidem a jeho rozdílu vůči střední hladině moře. Je dopočítávána dle vztahu (4.4) [51].

$$h = H - N_{(\lambda, \psi)} \quad (4.4)$$

Princip systému WGS84 a jeho techniky určování polohy je uveden na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Princip určování polohy dle systému WGS84 [32].

4.5 Komunikační rozhraní a protokoly

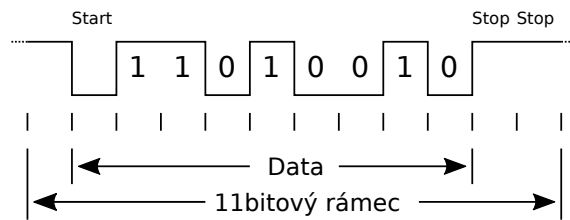
Každý snímač musí disponovat rozhraním, skrz které bude poskytovat naměřené hodnoty. Mezi nejčastější patří výstup v definovaném napěťovém rozsahu (obvykle 0–10 V), výstup v definovaném proudovém rozsahu (obvykle 0–20 mA), nebo digitální sériové rozhraní umožňující i obousměrnou komunikaci nejen pro čtení naměřených dat, nýbrž také pro konfiguraci snímače.

4.5.1 UART

Univerzální asynchronní vysílač-přijímač UART je sériové digitální full-duplex² rozhraní skládající se ze tří vodičů, a to společného nulového potenciálu (země), vodičem pro příjem dat označovaný Rx a vodičem pro vysílání dat označovaný Tx. Funkce vodičů Tx a Rx je ovšem vztažena vždy pro konkrétní zařízení, neboť pro realizaci komunikace protistrana musí mít přesně opačnou funkci na daných vodičích. Díky absenci vodiče pro přenos hodinového signálu se jedná o asynchronní komunikaci, kdy přenosová rychlost (tzv. baud rate, počet přenesených bitů za sekundu včetně řídicích bitů) je konfigurovatelná, a je dána vysílacím zařízením. Přijímací zařízení musí být nastaveno na stejnou přenosovou rychlost, avšak v případě moderních prvků jsou již vybaveny obvody pro automatickou detekci přenosové rychlosti.

V klidovém stavu jsou na obou komunikačních vodičích logické úrovně reprezentující logickou 1. Přenos jedné zprávy se skládá z přenosu dílčích rámců (bytů), které se přenášejí jednotlivě. Přenos rámce spočívá v zaslání startovacího bitu (logická 0, synchronizuje hodiny přijímače s hodinami vysílače), 7–8 datových bitů, volitelně paritního bitu, a následně z jednoho až dvou stop bitů (logická 1), které poskytují přijímací straně dostatek času pro zpracování přijatého rámce (přesun dat z kruhového registru do paměti). Ukázka jednoho UART rámce je zobrazena na obrázku 4.5 [12].

²Full-duplex – umožňuje současně obousměrnou komunikaci.



Obrázek 4.5: Ukázka asynchronního sériového datového rámce UART.

Klidový stav, a tudíž i logická 1 nejsou definovány standardem a většinou odpovídá 3,3 V nebo 5 V, přičemž zařízení operující s napětím 3,3 V nemusí být kompatibilní s 5V úrovní a může dojít k jeho zničení. V takovém případě je třeba použít level-shifter (měnič úrovně).

4.5.2 I²C

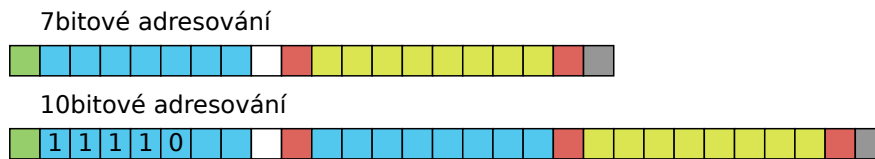
Sériové synchronní rozhraní I²C je rovněž tří-vodičové, skládající se ze společného nulového potenciálu (země), SCL vodiče pro přenos hodinového signálu s typickou frekvencí 100 kHz nebo 400 kHz, a SDA vodiče pro přenos dat v obou směrech. Komunikační vodiče (SDA a SCL) musí být zapojeny v režimu otevřeného kolektoru, kdy jsou připojeny k napětí typicky v rozsahu 3,3–5 V pomocí pull-up rezistorů s hodnotami obvykle v rozsahu 4,7–10 kΩ [29].

Ačkoli se jedná o sběrnici, není definováno řídicí zařízení, které by řídilo veškerou komunikaci a určovalo, kdo v který okamžik ji bude využívat. Jednotlivá zařízení připojená ke sběrnici mají z výroby definovanou adresu, případně lze až 3 LSB bity nastavit připojením konkrétních pinů daných zařízení k definované logické úrovni.

Datový přenos probíhá po blocích skládajících se z libovolného nenulového počtu rámců, který je reprezentován bytem přenášených dat a potvrzujícím bitem. Přenos bloku je zahájen startovací podmínkou generovanou zařízením, které iniciuje komunikaci, které uzemní SDA vodič, čímž na něm vytvoří sestupnou hranu ve chvíli vysoké logické úrovně na vodiči SCL, následně aktivuje hodinový signál pro přenos jednotlivých bitů, neboť napěťové úrovně (bity) na SDA vodiči jsou vzorkovány při náběžných hranách SCL. Výběr zařízení, se kterým chceme komunikovat spočívá ve vystavení jeho adresy na SDA a vystavení bitu, jenž značí účel komunikace (čtení/zápis). Pokud je zařízení s danou adresou připojeno ke sběrnici a připraveno komunikovat, potvrdí příjem dat uzemněním SDA do logické 0. Po přenosu adresovacích rámců je zahájen samotný přenos datových rámců, přičemž po odeslání posledního datového rámce je generována ukončující podmínka. Při 7bitovém adresování je zaslán jediný adresovací rámeček, při 10bitovém adresování jsou zaslány dva, přičemž první (MSB) má pevně definovanou předponu 11110. Ukázka adresování a přenosu jednoho rámce dat je zobrazena na obrázku 4.6, na kterém startovací podmínka je zvýrazněna zeleně, adresové bity modře, bit určující čtení/zápis bíle, potvrzující bit červeně, datové bity žlutě a ukončující podmínka šedě [12].

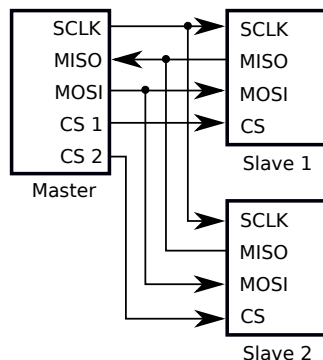
4.5.3 SPI

Sériové periferní rozhraní SPI je navrženo pro komunikaci jednoho centrálního zařízení, označovaného jako **Master**, s několika periferními zařízeními, označovanými jako **Slave**. Využívá čtyř vodičů pro full-duplex synchronní komunikaci, a to společného nulového po-



Obrázek 4.6: Ukázka generického rámce komunikačního rozhraní I²C.

tenciálu (země), vodičem pro přenos hodinového signálu (SCLK), vodičem pro přenos dat od řídicího zařízení k perifériím (MOSI) a vodič pro přenos dat od periferních zařízení do řídicího zařízení (MISO). Přenos dat je řízen hodinovým signálem, kdy na každé náběžné hraně tohoto signálu je přenesen jeden bit v obou směrech komunikace. Pro výběr periferního zařízení pro komunikaci je vyhrazen vodič (skupina vodičů) *slave select* (SS), případně v odlišné terminologii *chip select* (CS). Pro výběr konkrétní periferie musí být daný signál v nízké logické úrovni. Ukázka schématického zapojení SPI rozhraní 3 zařízení je uvedena na obrázku 4.7 [12].



Obrázek 4.7: Ukázka schématického zapojení 3 zařízení prostřednictvím SPI rozhraní.

Ve většině případů je řídicím prvkem mikrokontrolér, který může disponovat velmi velkým počtem pinů s obecným využitím. Aby však nemusel být alokován jeden pin pro jedno zařízení pro ovládání SC, je zde možné s výhodou využít dekodér, s jehož pomocí lze vybírat ke komunikaci až 2^n periferních zařízení, kde n značí počet adresových bitů a také pinů, jenž budou využity na mikrokontroléru.

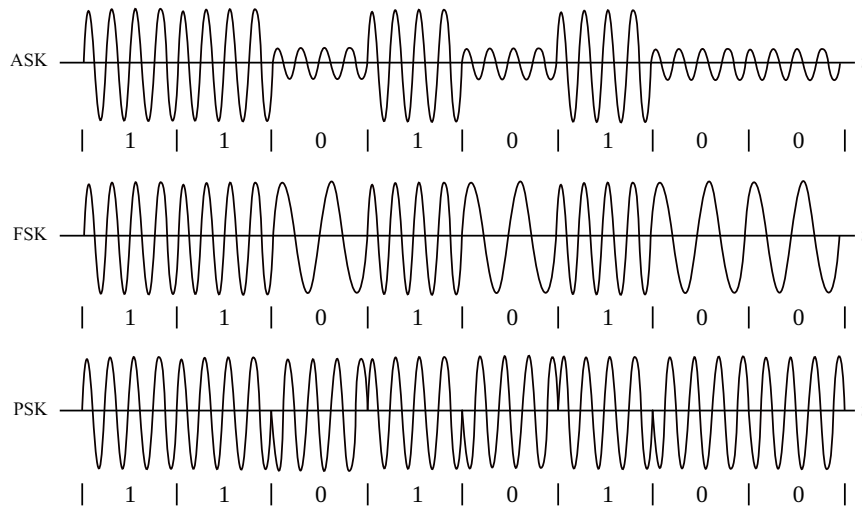
4.5.4 FSK

Klíčování frekvenčním posuvem (FSK) je druh frekvenční modulace pro přenos digitálních dat. Digitální signál je možné modulovat amplitudou, frekvencí nebo fází nosné vlny. Nosná vlna je vysokofrekvenční signál na definované frekvenci, na který se vhodně moduluje přenášený užitečný signál. Modulací se rozumí taková úprava nosné vlny, aby bylo možné rozpoznat přenášený signál. Klíčování frekvenčním posuvem pro přenášení digitálního signálu využívá dva vysokofrekvenční signály s definovanými frekvencemi, mezi kterými plynule přepíná, přičemž jedna frekvence reprezentuje logickou 0 a druhá logickou 1 (4.5). Ukázka základních binárních modulací včetně FSK je uvedena na obrázku 4.8, přičemž

ASK značí klíčování amplitudovým posuvem, FSK značí klíčování frekvenčním posuvem a PSK značí klíčování fázovým posuvem [10].

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t) \quad (4.5a)$$

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t) \quad (4.5b)$$



Obrázek 4.8: Ukázka základních binárních rádiových modulací.

V porovnání FSK s dalšími základními druhy binárních modulací má menší pravděpodobnost chyby, velký poměr signálu k šumu, vyšší odolnost proti šumu díky konstantní obálce, avšak vyžaduje širší šířku pásma.

4.5.5 Útlum rádiových vln

V každém prostředí, i při přechodu mezi různými prostředími, vzniká při rádiové komunikaci útlum, který snižuje amplitudu přenášeného signálu, kvůli kterému se nakonec může signál utlumit natolik, že jej nebude možné rozeznat v šumu. Útlum se udává v decibelech, které vyjadřují poměr výstupu vůči vstupu různých veličin v logaritmickém měřítku (4.6) [10].

$$L = 20 \cdot \log_{10} \frac{P_o}{P_i} \quad (4.6)$$

Obvykle se však za vstupní výkon implicitně uvažuje 1 mW, a aby nedošlo k záměně, jednotka útlumu je vyjádřena v dBm, případně v dBW při implicitním vstupním výkonu 1 W. Útlum ve volném prostředí (zemské atmosféře), který bude představovat největší ztráty, je nejen závislý na vzdálenosti, ale také na pracovní frekvenci vysílače, a je definován dle vztahu (4.7) [10]. Z dané rovnice vyplývá, že s rostoucí pracovní frekvencí úměrně roste i útlum prostředí.

$$L = 92,4 + 20 \cdot \log_{10} f + 20 \cdot \log_{10} l \quad (4.7)$$

4.5.6 NMEA 0183

Standard NMEA 0183 byl původně určený pro automatizovaný přenos dat mezi námořnickými elektronickými zařízeními a byl vyvinut Národní asociací pro námořní elektroniku (NMEA). Jelikož mezi dané zařízení se zařazoval i přijímač systému GPS, proto i GPS přijímač musel komunikovat tímto standardem. Díky vhodně zvolené obecné definici rozhraní pro GPS přijímače, stal se tento standard široce používaný i mimo oblast námořních aplikací [51].

Komunikace je definována nad sériovým asynchronním rozhraním, která probíhá výhradně v textovém režimu, přičemž délka vět nepřesahuje 82 znaků, včetně uvozujícího znaku \$ a koncovou sekvencí <CR> a <LF>.

Formát jedné věty má následující tvar:

- startovací symbol \$,
- adresové pole — skládá se pouze z velkých písmen a číslic, je rozděleno na dvě části, přičemž první o maximální délce dvou znaků uvádí identifikátor mluvčího, druhý o délce tří znaků uvádí druh obsahu věty,
- data — libovolný počet hodnot, jež jsou odděleny čárkou, jsou definovány druhem věty,
- kontrolní součet — uvozený znakem *, za kterým následuje v hexadecimálním zápisu exkluzivní disjunkce všech znaků mezi \$ a *,
- koncová sekvence <CR><LF>.

Standard definuje celkem tři kategorie vět:

- vysílací věta — definovaný identifikátor mluvčího, obsah věty je definován standardem,
- proprietární věta — identifikátor mluvčího je P, obsah zprávy není definovaný standardem, ale výrobcem,
- dotazovací věta — identifikátor mluvčího je zastoupen zařízením, které poptává data, za ním bezprostředně následuje identifikátor posluchače, na kterého míří dotaz, za kterým následuje znak Q, čímž je plně definováno adresové pole, přičemž první datová položka obsahuje identifikátor věty, na kterou se mluvčí dotazuje.

Definované identifikátory mluvčích spolu se standardními zprávami jsou uvedené v [8].

4.6 Nejistota měření

Každá naměřená hodnota je vždy zatížena chybou, neboť měření je v jisté míře ovlivňováno vnějším prostředím, měřícím postupem, a především měřícím aparátem. Věda, jež se zabývá měřením, se nazývá *Metrologie*, která [28]:

- definuje mezinárodně uznávané jednotky měření,
- realizuje jednotky měření pomocí vědeckých metod,
- vytváří řetězce návaznosti stanovením a dokumentováním hodnot, přesnosti měření a přenosu těchto údajů.

Výsledek měření nespočívá jen v odečtení změřené hodnoty, nýbrž také určením její nejistoty, která specifikuje s určitou pravděpodobností, že odečtená hodnota z měřicího přístroje leží v určitém intervalu skutečných hodnot. Nejistoty měření se seskupují do dvou základních kategorií, a to [28]:

- nejistota typu A — vyhodnocena statistickými metodami, zahrnuje „náhodné“ vlivy,
- nejistota typu B — vyhodnocena jinými způsoby, kupříkladu sérií pozorováním, zahrnuje „systematické“ vlivy.

Mezi nejčastější příčiny vzniku nejistot měření můžeme zahrnout neúplné definování postupu měření a jeho provedení, odečítání nereprezentativních vzorků, neadekvátní znalost vnějších vlivů na proces měření, subjektivní vnímání naměřených výsledků na analogových přístrojích, omezenou přesností snímačů, nepřesné hodnoty měřících standardů, referenčních manuálů, konstant a parametrů [4].

4.6.1 Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A reprezentuje náhodné vlivy, které nelze kvantifikovat jiným způsobem, a zjišťuje se z opakovaných měření jako rozptyl těchto hodnot. Míře nejistoty typu A $u_A(x)$ odpovídá výběrová směrodatná odchylka $s_{\bar{x}}$ (4.8) výběrového průměru \bar{x} (4.9) za předpokladu, kdy je pro výpočet použito alespoň 10 vzorků [4].

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.8)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.9)$$

V případě použití 9 vzorků a méně je nutné pro míru nejistoty typu A užít vztah (4.10) s koeficientem rozšíření k_a , jehož hodnoty dle počtu vzorků n jsou uvedeny v tabulce 4.1 [4].

$$u_A(x) = k_a s_{\bar{x}} \quad (4.10)$$

Tabulka 4.1: Koeficient rozšíření k_a pro standardní nejistotu typu A.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_a	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

4.6.2 Standardní nejistota typu B

Standardní nejistota typu B uvažuje vícero zdrojů nejistoty měření u_{B_z} , které byly stanoveny jinak než opakovaným měřením a jsou mnohdy uváděné v technických dokumentacích.

Každý zdroj u_{B_z} (4.11) takové nejistoty by měl mít definovaný maximální absolutní interval $\pm \Delta_{z_{max}}$, přičemž rozložení pravděpodobnosti výskytu vzorku v daném intervalu by mělo odpovídat konkrétnímu rozložení pravděpodobnosti, na jehož základě se zvolí odpovídající koeficient χ [4].

$$u_{B_z}(x) = \frac{\Delta_{z_{max}}}{\chi} \quad (4.11)$$

Výsledná nejistota typu B je dána geometrickým součtem jednotlivých zdrojů nejistot dle vztahu (4.12).

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{z=1}^m u_{B_z}^2} \quad (4.12)$$

Pro analogově-číslicové převodníky je výsledek převodu zatížen chybou, jež odpovídá polovině kvantizační úrovně, která je vypočtena dle vztahu (4.13) s počtem bitů n .

$$\Delta_{z_{max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{max} - U_{min}}{2^n} \quad (4.13)$$

Rezistivní komponenty jsou vždy vyráběny s určitou tolerancí rezistivity, která je pro rezistory obvykle udávána v procentech, a proto pro výpočet nejistoty je nutné danou chybu vyjádřit absolutní hodnotou (4.14). Pro platinové snímače je tolerance rezistivity dána vztahem, jež odpovídá patřičné třídě. Přehled vztahů dle jednotlivých tříd již byl uveden v tabulce 2.1.

$$\Delta_{z_{max}} = \frac{R \cdot tolerance}{100} \quad (4.14)$$

4.6.3 Nejistota nepřímého měření

Mnohdy je cílem měřit veličinu Y , jež je dána výpočtem (funkcí f) několika měřených veličin X_i (4.15a). V takovém případě se k výpočtu užívají střední hodnoty výsledků měření \bar{x}_i , čímž dostaneme střední hodnotu výsledku \bar{y} (4.15b) [4].

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i) \quad (4.15a)$$

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i) \quad (4.15b)$$

Měřené veličiny zanášejí do výpočtu jistou míru nejistoty, která se pro jednotlivé veličiny určí pomocí citlivostních koeficientů A_i , jež se získají parciální derivací funkční závislosti Y (4.16).

$$A_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (4.16)$$

4.6.4 Kombinovaná nejistota

Kombinací standardní nejistoty typu A a standardní nejistoty typu B pomocí geometrického součtu dle vztahu (4.17) získáme kombinovanou nejistotu $u_c(x)$ [4].

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (4.17)$$

4.6.5 Rozšířená nejistota

Na základě kombinované nejistoty a koeficientu rozšíření k_e definujeme interval výsledku měření, u kterého lze očekávat, že bude zahrnovat výraznou část hodnot, které lze přiřadit měřené veličině. Koeficient rozšíření k_e obecně nabývá hodnot z intervalu 2–3, přičemž $k_e = 2$ pro normální rozložení odpovídá 95% pravděpodobnosti ($k_e = 3$ odpovídá 99,7% pravděpodobnosti), že se odečtená hodnota nachází v intervalu, jehož šířku udává rozšířená nejistota $U_e(x)$ (4.18) [4].

$$U_e(x) = k_e \cdot u_c(x) \quad (4.18)$$

Kapitola 5

Návrh platformy pro aerologická měření

Tato kapitola pojednává o rozboru a návrhu aerologické rádiové sondy, která je schopna měřit teplotu, tlak a vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru a svoji polohu, přičemž naměřené hodnoty zasílá v aktuálním čase přijímací stanici za použití rádiových vln a zároveň tato data ukládá na vyšší frekvenci na paměťovou kartu.

Aby byl návrh směřodatný, je třeba si nejdříve stanovit parametry a podmínky, kterými se bude výběr jednotlivých součástí řídit. V první řadě je nutné si definovat cenovou hladinu, kterou by výroba platformy neměla přesáhnout. Meteorologický balón, nosný plyn, padák dle potřeby a pojištění letu jsou náklady, se kterými je třeba vždy počítat, bez ohledu, jaký náklad má balón dopravit do atmosféry, proto do cenového limitu nejsou započítány. Rozumná cena za sondu, vzhledem k charakteristice měření, se jeví mezi 2 000–4 000 Kč.

Důležitým aspektem sondy je její hmotnost, která by měla být malá, proto výběr jednotlivých komponent bude z velké části zaměřen nejen na přesnost a cenu, ale také na jejich hmotnost. Důležitá je také maximální výška, pro kterou by měla být sonda schopna měřit. Pro naši misi byla zvolena hladina 11 km, která odpovídá troposféře. Je očekávatelné, že se nelze ve všech parametrech sondy dostat na parametry profesionálních meteorologických rádiových sond, ba dokonce se k nim přiblížit z důvodu dostupnosti komponent, a dále z již zmíněných omezení a limitů. Jelikož cílové pracovní prostředí se vyznačuje nízkou teplotou, je třeba všechny elektronické součástky vybírat až na spodní hranici provozních teplot běžně dostupných elektrocnických komponent, což ve většině případů odpovídá teplotě -40°C . Rovněž je žádoucí zvolit úroveň napájecího napětí, které by mělo být jednotné, aby se omezilo množství potřebných komponent, a tím i zbytečné zvyšování hmotnosti a složitosti. Za výsledné napájecí napětí tedy bylo zvoleno 3,3 V, které reflektuje pracovní napětí značné části moderních elektronických komponent.

Vzorkovací frekvence pro všechny snímané veličiny vzhledem k charakteru měření nemusí být nikterak veliká, neboť nejsou očekávané prudké výkyvy měřených veličin a velká vzorkovací frekvence by nepřinesla výrazný užitek, ba naopak, zvýšila by se spotřeba celého systému. Pracovní vzorkovací frekvence proto byla zvolena 4 Hz, se kterou se snímají všechny požadované atmosférické veličiny, zároveň však je nutné vybraná naměřená data v reálném čase zasílat pozemní stanici, aby bylo možné sledovat polohu sondy. Tato frekvence proto nemusí být tak vysoká, jako samotná snímací frekvence, a z tohoto důvodu byla zvolena na 0,1 Hz.

5.1 Výběr komponent sondy

Jak již bylo popsáno v kapitole 4, bude aerologická sonda měřit PTU veličiny, rychlost a směr větru. Jelikož se sonda bude pohybovat v klimaticky náročných podmínkách, nabízí se otázka, zda by nebylo vhodné používat vícero snímačů pro jednotlivé veličiny a zvýšit tím celkovou spolehlivost systému. Tato myšlenka je v zásadě správná, ale je nutné uvážit dopady, kterými by byly zvýšené nároky na napájení, zvýšená hmotnost sondy, zvýšení celkových nákladů, a v konečném důsledku pravděpodobně i větší balón, což by mohlo mít za následek posunutí kvalifikace celé platformy. Z uvedeného by poté plynulo složitější vyřizování povolení k letu a další náležitosti. Z tohoto důvodu je každá měřená veličina primárně zastoupena pouze jedním snímačem. Jedinou výjimku tvoří snímání teploty uvnitř sondy, neboť většina čidel pro měření environmentálních veličin zároveň obsahuje i teplotní čidlo, podle kterého se převod kýžené veličiny kompenzuje, přičemž naměřená teplota je spolu s hlavní měřenou veličinou dostupná uživateli.

5.1.1 Snímání teploty vzduchu

Z grafu 2.2 je patrné, že předpokládaná teplota vzduchu ve vyšších vrstvách atmosféry dosahuje až $-56,5\text{ }^\circ\text{C}$. Vlivem proudění vzduchu se tato hodnota může ještě o několik stupňů snížit. Z tohoto důvodu je nutné vybírat takový teplotní snímač, který je schopen správně fungovat alespoň již při $-70\text{ }^\circ\text{C}$. Měření okolní teploty pomocí termistorů za daných podmínek není běžné, neboť dle katalogového listu jednoho z největších průmyslových dodavatelů snímačů společnosti *Honeywell*¹, termistory jsou dodávány pro teplotu prostřední od $-60\text{ }^\circ\text{C}$. Na základě výše uvedeného se jeví jako správný způsob měření teploty pomocí platinového odporového snímače *PT1000*, který má při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$ rezistivitu $1\text{ }000\ \Omega$. Obecně by bylo možné použít podobné snímače *PT100* nebo *PT500*, jejichž číselné označení udává jejich nominální rezistivitu při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$, avšak v důsledku jejich nižší rezistivity jimi prochází vyšší proud, který je o to více zahřívá a výsledné měření by bylo méně přesné. V literatuře je daný jev označován jako *self-heating*. Této skutečnosti je také vhodně využito i při řešení otázky spotřeby celé sondy, kdy je třeba vnímat každý mA.

Díky tomu, že se jedná o průmyslové snímače, jsou dle normy DIN 60751, jak již bylo uvedeno v tabulce 2.1, rozděleny do tolerančních tříd, a nezáleží tolik, od jaké společnosti finální snímač bude, neboť musí splňovat stejnou normu.

Třída AA je pro naše účely nepoužitelná, neboť její teplotní rozsah nepokrývá teploty v očekávaném prostředí. Třída A již ano, ale mezi volně dostupnými snímači se nenachází takový, který by pokrýval teplotu v očekávaném prostředí. Výsledný snímač je proto nutné vybrat z třídy B. Na základě dostupnosti a požadovaných vlastností byl vybrán snímač *PT 1000-550* od společnosti *PROFFUSE*, který se vyznačuje následující parametry [47]:

- teplotní koeficient TKR $3\ 850\text{ ppm }^\circ\text{C}^{-1}$, který je vypočten dle vztahu 5.1,
- dlouhá teplotní stabilita, kdy se po 1 000 hodinách provozu snímače při teplotě $500\text{ }^\circ\text{C}$ změní jeho nominální rezistivita R_0 o $0,04\%$,
- malé rozměry, které jsou $2,3 \times 2,1 \times 0,9\text{ mm}$, přičemž délka vodičů je $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$,
- teplotní odezva pro proudění vzduchu o rychlosti 2 m s^{-1} je $t_{0,5} = 3,0\text{ s}$ a $t_{0,9} = 10\text{ s}$, což znamená, že snímač potřebuje dobu t pro reakci na 50% (90%) změny teploty.

¹<https://sps.honeywell.com/us/en/products/sensing-and-iot/sensors/temperature-sensors/thermistors>

$$TKR = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \cdot 10^6 \quad (5.1)$$

Daný snímač je vybaven jen dvěma vývody, proto zde není nutné popisovat princip 3vodičové a 4vodičové metody měření rezistivity, které vykazují přesnější výsledky měření. Snímač s více vývody není potřeba, jelikož jeho vývody mají zanedbatelnou rezistivitu a v rámci návrhu desky plošného spoje můžeme zaručit takové podmínky, aby výsledné vedení nemělo výrazný vliv na výsledky měření.

Výpočet hodnoty předřadného rezistoru

Samotnou rezistivitu snímače nelze měřit přímo, proto je nutné ji převést na jinou vhodnou veličinu. V praxi se užívá měření rozdílů potenciálů na vývodech snímače, který je označován jako úbytek napětí na rezistoru. Pokud bychom *PT1000* připojili přímo mezi napájecí napětí a zem, neměřili bychom jeho úbytek napětí, nýbrž napětí zdroje. Z daného vyplývá, že je nutné jej zapojit do série ještě s dalším rezistorem, dále označovaným jako předřadník. Aby se minimalizovala chyba měření, předřadník musí být vyroben s malou tolerancí, a především musí mít dobrou teplotní stabilitu. Dle technického manuálu [47] je žádoucí, aby byl protékající proud snímačem v rozsahu 0,1–0,3 mA. Uvážíme-li očekávaný teplotní rozsah -70°C až $+40^\circ\text{C}$, přičemž pro dané hodnoty teploty odpovídají rezistivity 723,345–1155,408 Ω , dopočítáme dle Ohmova zákona, že by celková zátěž měla mít při uvážení napájecího napětí $V_{cc} = 3,3\text{ V}$ rezistivitu 11–33 k Ω .

Podle vztahu 5.2, který vyjadřuje úbytek napětí na jednom ze dvou rezistorů v sériovém zapojení při známých rezistivitách a celkovém napětí, dopočítáme rozsah úbytku napětí na *PT1000* v daném teplotním rozsahu.

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

Při celkové nominální rezistivitě zátěže 11 k Ω je hodnota úbytku napětí 203,614 mV až 313,749 mV, při celkové rezistivitě zátěže 33 k Ω je to pak 70,783–111,632 mV. Pro další zpracování signálu je žádoucí, aby byl dynamický rozsah byl co největší. Z tohoto důvodu volíme předřadník s rezistivitou z daného intervalu při dolní hranici, tj. přímo 11 k Ω , kdy je dynamický rozsah napětí na snímači $\Delta U_{PT1000} = 110,135\text{ mV}$.

Snímání úbytku napětí na snímači

Měření úbytku napětí se realizuje analogově-číslicovým převodníkem označovaný anglickou zkratkou ADC. Parametry takového převodníku jsou počet vstupních kanálů, vzorkovací frekvence, přesnost (počet bitů), rozhraní, pracovní teplota, spotřeba a referenční napětí, které může být externí nebo interní.

Z podstaty teplotního gradientu v atmosféře není potřeba snímat teplotu na vysoké frekvenci. Z praktického hlediska proto postačí jednotky či nízké desítky Hz, díky čemuž bude i výsledná spotřeba ADC menší. Vzhledem k tomu, že pro měření úbytku napětí na *PT1000* používáme napěťový dělič, je nutné pro co nejpřesnější výsledky měřit zároveň i jeho napájecí napětí. Z uvedeného plyne nutnost volby minimálně 2kanálového ADC s adekvátním počtem bitů. Pokud budeme chtít měřit napájecí napětí vyváženým děličem s rezistory o stejné rezistivitě a zajistíme vhodným uspořádáním na DPS, aby okolní vlivy byly co nejpodobnější na oba jeho členy, bude měřené napětí rovno polovině napájecího

napětí V_{cc} , tj. 1,65 V. Z uvedeného plyne, že referenční napětí pro ADC se zaokrouhlením na hodnoty mocniny 2 dosáhne hodnot 2,048 V.

Na základě zmíněných parametrů ADC byl vybrán převodník *MCP3423-E/UN* od výrobce *Microchip Technology* s následujícími parametry [40]:

- 2 měřící kanály,
- rozlišení až 18 bitů při vzorkovací frekvenci 3,75 Hz,
- rozhraní I²C,
- rozsah pracovních teplot -40°C až $+125^{\circ}\text{C}$,
- pracovní proud $145\ \mu\text{A}$,
- pracovní napětí 2,7–5,5 V.

Rozlišení 18 bitů umožňuje snímat napětí přesně, avšak k výpočtu teploty na 2 desetinná místa postačuje 16bitové rozlišení.

Souhrn

Výsledný obvod pro snímání teploty vzduchu je ve výsledku složen z jednoho snímače *PT1000-550*, tří přesných SMD rezistorů, jednoho ADC a dvou kondenzátorů pro optimální funkci ADC. Schéma daného obvodu je uvedeno v příloze D. Daný obvod by měl mít dle parametrů jednotlivých součástí při teplotě 0°C odběr $771,06\ \mu\text{V}$, přičemž váha daných komponent činí 0,173 g. Díky rozlišení na 16 bitů odpovídá nejméně významný bit (LSB) hodnotě $62,5\ \mu\text{V}$.

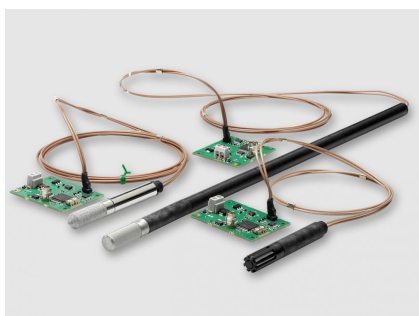
5.1.2 Snímání vlhkosti vzduchu

Snímání vlhkosti vzduchu je netriviální, neboť v daném teplotním rozsahu není vyloučen vznik námrazy ze vzdušné vlhkosti, která může zapříčinit nesprávnou funkci kontaktních snímačů. Uvedenému je možné zabránit, pokud by čidlo mělo vyšší teplotu než okolní vzduch, aby na něm nedošlo ke kondenzaci vlhkosti, která by umožňovala vytváření krystalů ledu.

Nejvýznamnější výrobce rádiových sond společnost *Vaisala* prodává i moduly a sondy pro měření relativní vlhkosti. Svoji konstrukcí jsou uvedena čidla určena především do pozemních meteorologických stanic, případně jiných prostředí, kde velikost a hmotnost nehraje významnou roli. Pro názornost jsou uvedeny na obrázku 5.1 dva moduly, kde první má analogový výstup, díky čemuž může pracovat při teplotách až -70°C , a druhý s digitálním výstupem je omezen na teploty vyšší než -40°C . Oba moduly jsou vybaveny snímačem *Vaisala HUMICAP[®] 180R* vyznačující se přesností až $\pm 0,8\ \%\text{RH}$ v závislosti na konkrétním produktu. Výrobce v produktovém katalogu nenabízí samotný senzor.

Na rádiových sondách téhož výrobce nicméně uvedený snímač nenalezneme. Samotné sondy obsahují i na míru vytvořený externí výložník zobrazený na obrázku 5.2, jenž zároveň měří teplotu a relativní vlhkost vzduchu v analogovém režimu, kdy se naměřené signály zpracovávají až uvnitř sondy. Jelikož samotný senzorický výložník není prodejní, ani žádný jemu podobný, je nutné vybrat snímač průmyslových kvalit. Nevýhodou tohoto řešení je fakt, že dané snímače jsou konstruovány s digitálním rozhraním v jednom pouzdře, kvůli

čemuž nejsou takové snímače dostupné pro teploty nižší než $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, jak napovídají on-line katalogové listy výrobců *Honeywell*² a *Texas Instruments*³.

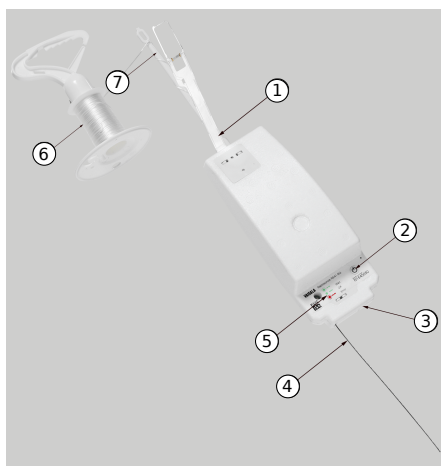


(a) Modul *HMM100*, převzato z [84].

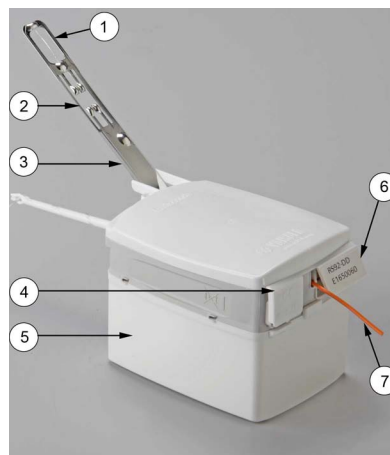


(b) Modul *HMM105*, převzato z [83].

Obrázek 5.1: Moduly pro měření relativní vlhkosti vzduchu od společnosti *Vaisala*.



(a) Označení komponent sondy *RS-41*.
1 – výložník, 2 – vypínač, 3 – proprietární rozhraní, 4 – anténa, 5 – LED indikátor, 6 – odvíječ, 7 – úchyt pro odvíječ, převzato z [80].



(b) Označení komponent sondy *RS-92*.
1 – teplotní snímač, 2 – snímač vlhkosti vzduchu, 3 – výložník, 4 – konektor pro připojení externích snímačů, 5 – pouzdro pro baterie, 6 – proprietární rozhraní, 7 – anténa, převzato z [81].

Obrázek 5.2: Zvýraznění jednotlivých komponent rádiových sond *RS-41* a *RS-92*.

²<https://sps.honeywell.com/us/en/products/sensing-and-iot/sensors/humidity-with-temperature-sensors>

³<https://www.ti.com/sensors/humidity-sensors/overview.html>

Kvůli zmíněnému faktu měření relativní vlhkosti vzduchu není dle technických parametrů dostupných snímačů přímo možné, leda bychom je vystavili takovým podmínkám, na které nebyly konstruovány. Z daného se naskýtají dvě východiska:

- Snímač umístit *vně sondy* tak, aby byl v kontaktu s okolním vzduchem. Přibližně od nadmořské výšky 8 km, která odpovídá $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dle ISA, se ovšem senzor dostane do prostředí, ve kterém nemůže měřit spolehlivě. Důležitá je také skutečnost, že na funkčnost snímače bude mít vliv i sluneční záření. Přihlédneme-li k faktu, že integrované obvody jsou tvořeny černým pouzdem, které oproti bílému povrchu výrazněji absorbuje infračervené záření, mohlo by dojít k nechtěnému zahřívání senzoru, které by mohlo zkreslovat výsledky.
- Snímač umístit k ostatní elektronice *do sondy*, která je chráněna před mrazivými podmínkami, avšak není zaručeno přímé proudění vzduchu okolo snímače.

První případ je ideální pro provádění měření v nízkých vrstvách atmosféry, kdy kýžená výška nepřesáhne 8 km. Ale jelikož naše sonda míří do vyšších vrstev atmosféry, byla zvolena druhá možnost, tj. umístit snímač relativní vlhkosti vzduchu do sondy. Aby však snímač mohl měřit, přestože můžeme očekávat, že sonda nebude neprodyšná a nějaká data by byla naměřena i uvnitř sondy, je nutné vytvořit otvor od snímače skrz obal sondy přímo ven k okolní atmosféře.

Pro lepší pochopení rozdílu mezi snímači zmíněných společností jsou uvedeny jejich vybrané produkty v tabulce 5.1. Samozřejmostí je zúžený výběr, který reflektuje rozsah měření 0–100 %RH, minimální teplota $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a napájecí napětí 3,3 V.

Tabulka 5.1: Přehled snímačů pro měření relativní vzdušné vlhkosti výrobců *Honeywell* a *Texas Instruments*.

Typ	Přesnost měření		Spotřeba	
	Vlhkost (%RH)	Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Pasivní	Aktivní
HDC2021 [70]	± 2	$\pm 0,2$	50 nA	650 μA
HDC1080 [69]	± 2	$\pm 0,2$	100 nA	650 μA
HIH9131 [26]	$\pm 1,7$	$\pm 0,3$	600 nA	650 μA
HIH8131 [25]	± 2	$\pm 0,5$	600 nA	650 μA
HIH7131 [24]	± 4	$\pm 0,5$	600 nA	650 μA
HIH6031 [23]	$\pm 4,5$	± 1	600 nA	650 μA

Vybrané snímače mají ADC převodníky se shodným počtem bitů (14), zároveň jsou si podobné i ve své typické spotřebě. Typická přesnost snímačů pro měření relativní vzdušné vlhkosti v průmyslu může dosahovat až 1,7 %RH, avšak takové přesnosti dosahuje jen jeden snímač, který v době psaní této práce není dostupný pomocí běžných distribučních kanálů. Jedná se o pokročilejší a přesnější řadu snímačů od společnosti *Honeywell*, přičemž ostatní jeho produktové řady vykazují měření se sníženou přesností při stejných napájecích podmínkách. Je proto výhodou, že dané řady jsou z pohledu typu pouzder vzájemně zaměnitelné, čehož lze s výhodou využít. Konkurenční snímače vykazují sníženou přesnost měření relativní vlhkosti vzduchu, na druhou stranu dosahují lepší přesnosti měření při snímání teploty. Pro naplnění cíle měření relativní vlhkosti vzduchu je zvolen senzor *HIH8131*

v SMD pouzdře, který svoji primární veličinu snímá se stejnou přesností, jakou dosahují konkurenční snímače, navíc je zde otevřena možnost budoucí výměny za *HIH9131* pro maximalizaci přesnosti měření. Daný snímač je dostupný i v THT pouzdře pod označením *HIH8121*, jehož integrace je snazší, a z pohledu přístupu vzduchu ke snímači i vhodnější, avšak s ohledem na odolnost vůči vibracím byla vybrána varianta v SMD provedení.

HIH8131 s hydrofobním⁴ filtrem založený na snímání kapacity polymeru má následující vlastnosti [25]:

- přesnost $\pm 2,0\%$ pro měření relativní vlhkosti vzduchu,
- rozlišení $0,04\%RH$,
- přesnost $\pm 0,5\text{ }^\circ C$ pro měření teploty vzduchu,
- rozlišení $0,025\text{ }^\circ C$,
- teplotní rozsah měření $-40\text{ }^\circ C$ až $+125\text{ }^\circ C$,
- 14bitový ADC,
- pracovní proud $750\text{ }\mu A$.

Souhrn

Možnost měřit relativní vlhkost vzduchu v plném rozsahu nemá výrazný vliv na hmotnost nebo spotřebu sondy, neboť pro správnou funkci snímače stačí pouze tři kondenzátory. Celková spotřeba je tudíž rovna spotřebě snímače ($650\text{ }\mu A$), celková hmotnost pak součtu hmotnosti snímače a patřičných kondenzátorů, tj. $0,137\text{ g}$. K převodu analogových veličin do digitální podoby je využit interní 14bitový ADC, díky kterému dosahuje rozlišení relativní vlhkosti vzduchu $0,04\%RH$ a teploty $0,025\text{ }^\circ C$ [25].

5.1.3 Snímání atmosférického tlaku

Atmosférický tlak, pokud nebude sonda hermeticky uzavřená, lze měřit jak uvnitř, tak vně sondy, čehož lze s výhodou využít, neboť díky tomu můžeme použít tlakoměrné snímače, které nejsou konstruované na tak extrémní teploty. V on-line katalogích společností *Honeywell*⁵ a *TE Connectivity*⁶ zjistíme absenci tlakoměrů pro pracovní prostředí, jejichž teploty jsou nižší než $-40\text{ }^\circ C$. Pro horní omezení měřicího rozsahu můžeme použít standardní tlak při zemském povrchu, tj. $101,325\text{ kPa}$ dle ISA. Není vhodné zvolit příliš vysoký horní limit, protože daný rozsah hodnot bychom nevyužili a při využití ADC s konkrétním počtem bitů by došlo k poklesu přesnosti na kýženém rozsahu. Pokud chceme zachovat co nejmenší hmotnost, je nutné vybírat tlakoměr určený k osazení na DPS.

Senzory s vhodnými vlastnostmi pro měření atmosférického tlaku jsou produkty společnosti *Honeywell* řady *MPR* a od společnosti *TE Connectivity* produkty *MS5611-01BA03*, *MS5637-02BA03* a *MS5803-02BA01*. Soupis jejich vybraných parametrů je uveden v tabulce 5.2. Aktuální nabídka produktů řady *MPR* je však nyní omezena jen na jeden snímač, a to *MPRLS0025PA00001A*.

⁴Hydrofobní – odpuzující vodu.

⁵<https://sps.honeywell.com/us/en/products/sensing-and-iot/sensors/pressure-sensors/board-mount-pressure-sensors>

⁶<https://www.te.com/usa-en/plp/sensors/Y308D.html?q=&n=135117&type=products&samples=N&inStoreWithoutPL=false&instock>

Tabulka 5.2: Vybrané charakteristiky vybraných snímačů pro měření absolutního tlaku výrobců *Honeywell* a *TE Connectivity*.

Typ	Rozsah měření	Rozlišení	Spotřeba	
	mbar		Pasivní	Aktivní
MPRLS0025PA00001A [27]	0–1 724	24 bit	33,8 nA	1, 13 mA
MS5611-01BA03 [66]	10–1 200	24 bit	20 nA	12, 5 μ A
MS5637-02BA03 [65]	300–1 200	24 bit	10 nA	20, 09 μ A
MS5803-02BA01 [67]	300–1 100	24 bit	20 nA	12, 5s μ A

Dle uvedených rozsahů měření jednotlivých tlakoměrů zjistíme, že jsou schopny měřit přibližně až do výšky 9 150 m pro 300 mbar, případně do výšky 31 100 m pro tlak 10 mbar. Spodní limit 300 mbar je tudíž pro nás nedostatečný. Proto se výběr zúžil na dva kandidáty. Jelikož rozdíl ve spotřebě je u daných kandidátů markantní s přihlédnutím k faktu tak, že rozdíl v jejich spodním limitu měření je takřka zanedbatelný, byl vybrán snímač *MS5611-01BA03*.

Zvolený tlakoměr založený na piezo-rezistivní technologii je charakteristický následujícími vlastnostmi [66]:

- rozlišení 0,012 mbar pro tlak,
- přesnost měření $\pm 2,5$ mbar tlak,
- rozlišení $< 0,01$ °C pro teplotu,
- přesnost měření $\pm 0,8$ °C pro teplotu,
- teplotní rozsah měření -40 °C až $+85$ °C,
- 24bitový ADC,
- hmotnost 0,058 g.

5.1.4 Snímání polohy sondy

Nejpraktičtější je ke snímání polohy sondy použít některý z dostupných GNSS přijímačů. Ačkoli dané přijímače vyrábí mnoho společností, technické manuály k nabízeným přijímačům neobsahují informace, jakým způsobem implementují CoCom limity popsané v podkapitole 4.2.3. Z tohoto důvodu je pro zajištění získávání dat i ve výšce 18 km nad mořem třeba využít již vyzkoušenou řadu přijímačů. Mezi ověřenými moduly s dobrou spotřebou jsou produktové řady 4, 5, 6, 7, a 8 od firmy *U-Blox*. V rámci technologického vývoje je k dnešnímu dni z daného výčtu aktuální pouze řada 8 [76].

Firma *U-Blox* nabízí několik rodin GNSS přijímačů. V závislosti na fyzickém provedení (modul, SiP modul, čip, modul s anténou), přesnosti měření a jiných aspektech, je jejich přehled s vybranými parametry uveden v tabulce 5.3 [71].

Centimetrová a decimetrová přesnost se zdá být atraktivní, ale je třeba si uvědomit, že takové přesnosti dosahují prémiové moduly daných rodin, jejichž ceny se pohybují v řádu tisíců Kč, což by neúměrně zvyšovalo cenu sondy. Z pohledu přesnosti měření jsou si již

Tabulka 5.3: Přehled GNSS přijímačů společnosti *U-Blox* [71].

Rodina	Rozměry (mm)	Přenosť	Rozšířitelný
ZOE	4,5 × 4,5	metrová	Ano
EVA	7,0 × 7,0	metrová	Ano
MAX	9,7 × 10,1	metrová	Ne
NEO	12,2 × 16,0	decimetrová	Ano
ZED	17,0 × 22,0	centimetrová	Ano
CAM	9,6 × 14,0	metrová	Ne
SAM	15,5 × 15,5	metrová	Ne

zbývající rodiny rovny. SiP moduly *ZOE* a *EVA* se vyznačují malou velikostí, která je vykoupená opět vyšší cenou při relativně stejné hmotnosti, kdy rozdíl je v řádu desetin gramu. Rodiny *CAM* a *SAM* se od ostatních liší tím, že mají již integrované externí antény, což značně limituje možnosti návrhu, především umístění modulu tak, aby jeho anténa měla co nejlepší výhled na satelity. Z výše uvedených vlastností jednotlivých rodin GNSS modulů byla vybrána rodina *MAX*.

Moduly dané generace a rodiny se následně dělí podle jejich specifických vlastností označenými písmeny, kterými jsou například **P** – GNSS přijímač s velkou přesností, **C** – GNSS přijímač s krystalovou základnou, **Q** – GNSS přijímač s TCXO základnou, **T** – časový přijímač s TCXO základnou. Úplný přehled vlastností je uveden v [71].

Jelikož je předpokládána provozní teplota několik desítek °C pod bodem mrazu, je třeba vybrat takový modul, který má teplotně kompenzovaný krystalový oscilátor. Na základě výše uvedených vlastností a parametrů byl vybrán modul *MAX-M8Q*, který se vyznačuje následujícími charakteristikami [72]:

- standardní přesnost GNSS,
- schopnost přijímat signály GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou,
- dostupná UART a DCC⁷ rozhraní,
- pro profesionální použití,
- přesnost měření rychlosti 0,05 m s⁻¹,
- letová výška až 50 000 m,
- přesnost horizontální polohy pro GPS 2,5 m, GLONASS 4 m a BeiDou 3 m,
- váha 0,61 g,
- maximální odběr 67 mA.

⁷Rozhraní v souladu s I²C.

Volba GNSS antény

Volba antény GNSS přijímače je zásadním prvkem návrhu aerologické sondy, neboť určuje, jestli a jak kvalitní bude signál pro příjem GNSS dat. Poněvadž jsou poziční data kritická pro celou misi, je žádoucí vybrat anténu s dostatečně velkým ziskem. Proto je vhodné vybrat aktivní anténu s vestavěným nízko-šumovým zesilovačem i přes skutečnost, že aktivní antény v keramickém pouzdře se obvykle vyznačují vyšší hmotností oproti pasivním ve formě tenké fólie či SMD pouzdra.

Dle technického manuálu k modulu *MAX-M8Q* [72] musí mít aktivní anténa minimální zisk 15 dB, aby byla schopna kompenzovat útlum v koaxiálním kabelu. Zároveň však její zisk nesmí být vyšší než 50 dB při maximální velikosti šumu 1,5 dB. Cílová anténa musí mít impedanci 50Ω a napájecí napětí zahrnující úroveň 3,3 V a relativně malou spotřebu.

S ohledem na výše uvedené parametry byla vybrána anténa *GPS-ANT048*, jež je znázorněna na obrázku 5.3. Tato anténa se vyznačuje rozměry $18,6 \times 18,6$ mm, celkovým ziskem 28 ± 2 dB, velikostí šumu 1,5 dB a odběrem až 10 mA. Pro splnění požadavků umístění instalace do horní části sondy pro zaručení co nejlepšího výhledu na oblohu a tím i na satelity, byla vybrána zmíněná anténa v provedení s kabelem o délce 100 mm. Celková hmotnost antény s kabelem činí 8,9 g [60].



Obrázek 5.3: GNSS anténa *GPS-ANT048*, převzato z [60].

5.1.5 Měření úrovně napětí na bateriích

Měření úrovně napětí na bateriích není pro účely samotných misí kritické, ale díky znalosti teploty prostředí, ve kterém se budou baterie nacházet, lze odhadovat spotřebu celého systému a především také dobu aktivity. V laboratorních podmínkách ovšem není problém měřit odběr proudu systému, avšak bateriím klesá jejich kapacita vlivem okolní teploty, kterou lze jen velmi zhruba odhadovat kvůli vlivu samotného počasí. K měření úrovně napětí na bateriích je nutné opět využít ADC, přičemž se naskýtají celkem 3 možnosti:

1. využít ADC uvedený v sekci **Snímání teploty vzduchu** pro měření venkovní teploty,
2. osadit systém dedikovaným ADC využívaným pouze pro snímání úrovně napětí na bateriích,
3. využít interní ADC v mikrokontroléru.

Jelikož lze očekávat, že napájecí část sondy bude situována na opačném konci DPS než budou umístěné jednotlivé snímače, je nežádoucí vést dlouhý vodič od připojení baterií až k ADC pro měření venkovní teploty. Interní ADC mají většinou 12bitové rozlišení, což může být pro správnou predikci nedostačující (za předpokladu, že bychom měli přesné charakteristiky úrovně napětí na bateriích v závislosti na kapacitě a odebíraném proudu). Jako

ideální se jeví osadit sondu dedikovaným ADC pro měření úrovně napětí na bateriích, který bude poskytovat cenné informace při prvních letových experimentech, neboť po provedení několika letů při různých klimatických podmínkách již bude známa charakteristika vybíjení baterií, a tudíž pro další experimenty bude možnost samotnou DPS tímto snímačem neosazovat, aniž by to mělo výrazný vliv na chování systému.

Dle kritérií popsanych v sekci **Snímání teploty vzduchu** byl zvolen jednobitový 18bitový ADC *MCP3421* ze stejné rodiny ADC, a tudíž se stejnými charakteristikami. Poněvadž referenční napětí ADC je pouze 2,048 V [40], je nutné použít dělič napětí o vhodném poměru, aby úroveň napětí na bateriích s využitím daného děliče napětí byla za všech okolností pod daným limitem. Hodnotu rezistorů lze však určit až ve chvíli, kdy budou známy parametry napájení sondy.

5.1.6 Snímání prostorové orientace

Profesionální meteorologické sondy nemají potřebu snímat jejich prostorovou orientaci či zrychlení, proto těmito moduly nejsou osazovány. Z vědeckého hlediska jsou však tyto veličiny zajímavé, kdy na základě jejich dat lze sledovat, jestli náhodou nedochází k velké rotaci sondy, jak se chová sonda v okamžiku prasknutí nosného balónu, a případně která strana sondy je vystavena přímému slunečnímu záření.

S výhodou lze vybrat takový integrovaný obvod, který je schopen měřit jak prostorovou orientaci, tak i zrychlení ve všech 3 osách, aby se minimalizoval počet komponent a tím i spotřeba. Bohužel nabídka takových snímačů není velká, zvláště s přihlédnutím k parametrům, které jsme si definovali v úvodu této kapitoly.

Parametry akcelerometrů a gyroskopů výrobců *Bosch Sensortec* a *TDK InvenSense* jsou si velmi podobné v klíčových parametrech, a proto tolik nezáleží, který konkrétní model bude vybrán. Finální volba padla na inerciální měřící jednotku (IMU) *ICM-20608-G* od společnosti *TDK InvenSense*, která se vyznačuje následujícími parametry [33]:

- provozní proud 3 mA,
- provozní teplota od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$,
- 3osý gyroskop s programovatelným rozsahem ± 250 , ± 500 , $\pm 1\,000$ a $\pm 2\,000^{\circ}\text{s}^{-1}$,
- 3osý akcelerometr s programovatelným rozsahem ± 2 , ± 4 , ± 6 a $\pm 8\text{ g}$,
- 16bitový ADC.

5.1.7 Rádiová komunikace

Pro dosažení průběžného přehledu o měřených veličinách (především o poloze) je nutné sondu vybavit vysílačem rádiových vln. Prvním parametrem takové komunikace, kterým je nutné se zabývat, je volba komunikační frekvence. Ačkoli pro meteorologické použití, jak již bylo popsáno v sekci **Legislativní požadavky**, je vyhrazené pásmo 400,15–406 MHz při maximálním vyzářovaném výkonu 200 mW, byla učiněna volba využít bezlicenční ISM pásmo 433 MHz, ve kterém není garance proti rušení a maximální vyzářovací výkon je omezen na 10 mW s omezením na klíčovací poměr 10 %⁸. Tato volba byla učiněna zejména proto, že nejsou běžně dostupné vysílače pro pásmo 400,15–406 MHz, přičemž každý, kdo by si chtěl tuto sondu vyrobit, by musel žádat ČTÚ o přidělení konkrétní frekvence.

⁸Klíčovací poměr (duty cycle) je podíl času, kdy zařízení aktivně vysílá, v rámci jakékoliv jedné hodiny.

Zasílání dat pomocí APRS na frekvenci 144 MHz, která je volně dostupná pro radioamatéry, by bylo vhodné, ale vyžadovalo by radioamatérskou licenci dle zákona č. 127/2005 o elektronických komunikacích. Rozbor této problematiky je uveden na serveru Českého Radioklubu⁹.

Alternativní zasílání dat pomocí Globálního systému pro mobilní komunikaci (GSM) nepřipadá v úvahu, neboť tento systém je navržen pro pozemní komunikaci, a ve vyšších výškách by nebyl k dispozici dostatečně silný signál, tudíž by komunikace mohla probíhat jen do výšky několika sta metrů. Vzhledem k tomu, že nelze přesně určit a hlavně ovlivnit místo dopadu, nelze zaručit, že během pádu nebo po dopadu by měla sonda dostatečný signál pro spojení s danou sítí a odeslání naměřených dat.

Výběr komunikačního rádiového modulu

V dnešní době není nutné vytvářet vysílací obvod na úrovni diskrétních součástek, jelikož jsou dostupné celé vysílací moduly s možností nastavení vysílací frekvence a výkonu. Při výběrání daných modulů je třeba mezi parametry zohledňovat frekvenci nosného signálu, maximální vysílací výkon, teplotní stabilitu, spotřebu, hmotnost a typ modulace.

Frekvence nosného signálu musí být v požadovaném intervalu pro bezlicenční ISM pásmo 433,05–434,79 MHz. I kvůli tomu by maximální vyzařovací výkon neměl přesáhnout 10 mW. Řada dostupných modulů umožňuje programově tento výkon nastavit. Z hlediska legislativních požadavků je zde vhodné, aby nebylo možné maximální výkon překročit.

Dostupné technické listy k daným modulům uvádí jen pracovní teplotní rozsah, nikoli však teplotní stabilitu na daném teplotním rozsahu, proto je třeba zjišťovat teplotní stabilitu empiricky. Pokud by rádiový modul nebyl dostatečně teplotně stabilní, došlo by při výrazné změně okolní teploty ke změně pracovní frekvence, a tím k možné ztrátě dat. Na serveru UKHAS [77] je uveden seznam některých vyzkoušených modulů, které již byly použity ve vyšších výškách atmosféry. Na základě těchto informací a legislativních omezení byl vybrán rádiový modul *Radiometrix MTX2* s frekvencí nosného signálu 434,000–434,750 MHz, FSK modulací popsanou v sekci 4.5.4, hmotností 4 g a maximálním vyzařovaným výkonem 10 mW při odběru 20 mA [49].

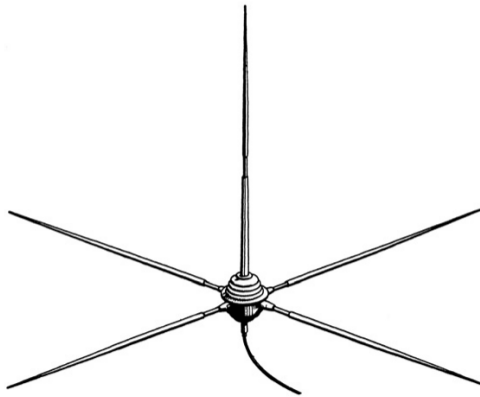
Volba antény pro rádiovou komunikaci

Běžně dostupné antény pro pásmo 433 MHz jsou šroubovicového typu a jsou vyráběny především pro použití v „domácím“ prostředí. Pro uvedené použití jsou zalité v plastovém obalu či gumě, aby byly dostatečně chráněné a nedošlo k rozladění cívky antény. Gumový obal antény ovšem nevhodně zvyšuje hmotnost celé antény. Tento typ antény dle konstrukce vyzařuje v axiálním nebo radiální směru [2]. Pro účely sondy je třeba vyzařování v axiálním směru, aby se signál šířil směrem k Zemi namísto pouze do stran. Bohužel se však běžně dostupné šroubovicové antény na potřebné frekvenci vyrábí v radiálním provedení, a tudíž jsou nevhodné, případně jsou nadměrně velké pro použití na sondě.

Východiskem z této situace je tvorba vlastní vertikální antény se zemní plochou (reflektorem), která je tvořena z vysílacího prutu o čtvrtinové délce vlnové délky, zemnicí plochou tvořenou 4 pruty o čtvrtinové délce vlnové délky a izolátorem mezi uvedenými částmi [11]. Vizualizace antény zmíněného typu je uvedena na obrázku 5.4. Jeden z možných postupů pro její výrobu je uveden zde¹⁰.

⁹<http://www.crk.cz/CZ>

¹⁰https://ukhas.org.uk/guides:payload_antenna



Obrázek 5.4: Vizualizace vertikální antény se zemnicí plochou, převzato z [11].

Vlnová délka je závislá na vysílací frekvenci a rychlosti šířeného signálu a je vypočtena dle vztahu (5.3), přičemž pro frekvenci 433 MHz odpovídá $\lambda_f = 0,692$ m, jejíž čtvrtinová délka činí 17,30 cm.

$$\lambda_f = \frac{c}{f} \quad (5.3)$$

Komunikační protokol

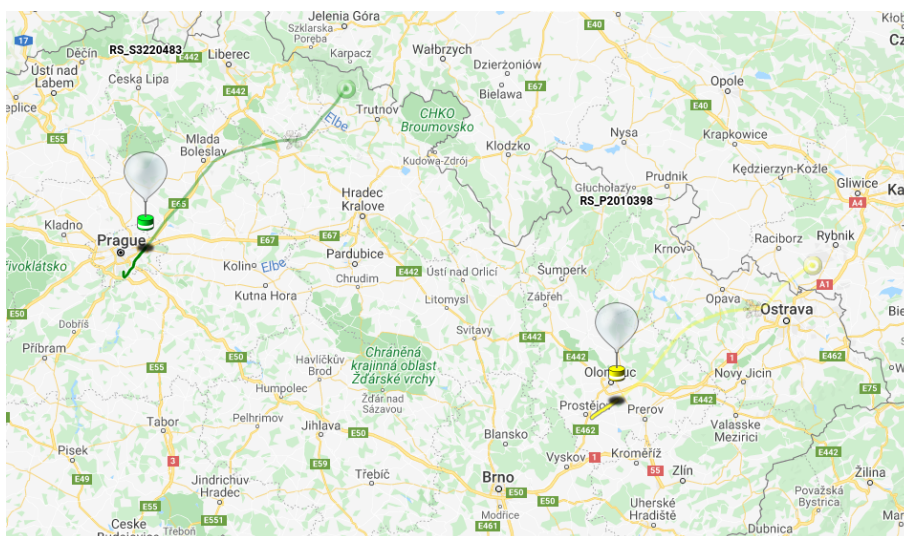
Zasílání dat ze sondy k pozemní stanici se musí řídit přesně stanoveným komunikačním protokolem. Jelikož se budou zasílat pouze polohové informace a některá naměřená data atmosférických veličin, tedy žádná citlivá data, je možné komunikovat v otevřeném formátu. Volba otevřeného komunikačního protokolu má jednu velkou výhodu, a to možnost sledovat pohyb sondy s pomocí sítě radioamatérů, kteří mohou zachytávat vysílaná data v době, kdy by přijímací stanice z jakéhokoli důvodu nedostávala nová data. Na základě výše uvedeného byl zvolen komunikační protokol používaný UKHAS, který se skládá z textového řetězce obsahujícího následující položky [75]:

- začátek zprávy \$\$,
- volací znak sondy,
- pořadové číslo zprávy,
- zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku, výšku,
- volitelný počet měřených veličin,
- oddělovač * následovaný kontrolním součtem,
- konec zprávy \n.

Bude-li komunikační protokol odpovídat výše popsanému protokolu, je možné vygenerovat *Konfigurační dokument nákladu*¹¹ zadáním výše uvedených parametrů. S pomocí tohoto dokumentu je možné využít on-line sledování polohy rádiových sond [20]. Ilustrační snímek

¹¹<http://habitat.habhub.org/genpayload/>

na obrázku 5.5 zobrazuje pohyby meteorologických sond ČHMÚ vypuštěných 12. 4. 2021 ve 13.15. Snímek pořízený ve 13.35 ilustruje pomocí zelené trajektorie pohyb radiosondy ze stanice Praha-Libuš. Let ze stanice Prostějov ilustruje žlutá trajektorie.



Obrázek 5.5: Snímek pohybu meteorologických sond [20].

5.1.8 Zálohování dat

Ukládání dat během mise je zvoleno především pro zachování dostatečné vzorkovací frekvence pro pozdější datovou analýzu. Současně se tím omezuje nutnost vysílání všech dat v reálném čase do prostoru. Pro ukládání dat se nabízí dvě možnosti:

1. zapisovat data do interní flash paměti mikrokontroléru nebo externí flash paměti,
2. zapisovat data do externího úložiště, kupříkladu na paměťovou kartu.

První varianta je po stránce implementace jednodušší, ale čtení dat by bylo komplikovanější z důvodu nestandardního přístupu k datům pro obvyčejného uživatele. Ten by musel použít vhodné rozhraní a speciální software. Na druhou stranu paměťová karta je rozšířený typ úložného média, jenž je dostupný ve velké škále úložného místa. Díky tomu, že jsou sloty pro připojení paměťové karty dostupné ve váze pod 1 g a faktu, že samotná paměťová karta nepřesahuje hmotnost 2 g [56], je preferovaným řešením osazení sondy slotem pro připojení paměťové karty.

Jelikož paměťová karta je odpojovatelné médium, je pro zaručení spolehlivého fungování sondy nutné detekovat připojení. Některé sloty jsou již vybaveny kontaktem, jenž je sepnut při správném zasunutí karty, a také zámkem, bez kterého by mohlo dojít k vysunutí karty během letu. Dle těchto parametrů byl vybrán nízko-profilový slot *DM3BT-DSF-PEJS* s váhou 0,862 g [21].

Výběr paměťové karty

Je zřejmé, že nelze použít obvyčejnou paměťovou kartu pro mobilní zařízení, neboť takové karty kvalitativně neodpovídají požadavkům použití v rádiové sondě. Hlavními parametry při výběru paměťové karty do standardního zařízení je její provedení, kapacita, rychlost

čtení a zápisu dat. V našem případě při uvážení zapisovací frekvence 4 Hz při velikosti jednoho vzorku o velikosti 100 B máme požadavek na rychlost zápisu 400 B s^{-1} , což při předpokládané době letu kolem dvou hodin činí 2,8125 kB. V obou zmíněných parametrech se ani zdaleka nepřibližujeme horním limitům běžně dostupných paměťových karet. Preferované provedení paměťové karty je microSD s ohledem na její hmotnost.

Nejdůležitějším parametrem je pracovní teplota. Největšími producenty paměťových karet jsou společnosti *Samsung*, *SanDisk* a *Kingston*. Prémiové karty řady **PRO Endurance Lineup** od společnosti *Samsung* mají pracovní teplotu jen od -25°C [55], stejně tak jako průmyslová řada od *SanDisk* [57].

Jedinou možností je proto výběr průmyslové řady **Industrial** od společnosti *Kingston*, která je dimenzovaná pro pracovní prostředí od -40°C . Daná karta je rovněž testována na voděodolnost dle IEC/EN 60529 IPX7 při trvalém ponoření v hloubce až 1 metr po dobu až 30 minut, na teplotní odolnost -40°C až $+85^\circ\text{C}$, odolnost proti vybíracím dle vojenského standardu MIL-STD-883H, METHOD 2002.5, a také na odolnost proti rentgenovému záření dle ISO7816-1. Rychlost této karty dosahuje 90 MB s^{-1} pro čtení a 45 MB s^{-1} pro zápis [36].

5.1.9 Mikrokontrolér

Díky určení funkce sondy, kdy probíhá jen snímání dat a jejich následné ukládání či odesílání a kdy nejsou prováděny žádné náročné výpočty, je možné vybrat jednojádrový mikrokontrolér pracující na malé frekvenci, při níž jsou sníženy nároky na napájení.

Kritickým snímačem celé sondy je GNSS modul, neboť bez jeho dat by byla ostatní naměřená data prostorově obtížně korelovatelná, jelikož by nebyla vztažena ke konkrétní poloze. Bez znalosti polohy bychom také nebyli schopni sondu po přistání lokalizovat. Pro minimalizaci možnosti ztráty dat z tohoto modulu, bude připojení k mikrokontroléru realizováno rozhraními určenými pouze pro daný modul, tj. jak UART, tak i I²C. Rovněž pro správnou funkci modulu budou připojeny i jeho piny **SafeBoot** a **TimePulse** v režimu GPIO.

Ostatní snímače disponují minimálně rozhraním I²C, případně i SPI, proto se nabízí je napojit na jednu společnou sběrnici I²C určenou jen a pouze pro obsluhu snímačů. Jak bylo uvedeno v sekci **Zálohování dat**, sonda bude vybavena paměťovou kartou, kterou lze mimo jiné připojit pomocí SPI rozhraní. Stav sondy je žádoucí signalizovat uživateli prostřednictvím LED indikátorů. Dle později definovaných signálů je možné indikovat správnou funkci sondy, poruchu, nízký stav baterie, nebo třeba detekci chybějící paměťové karty. Během navazující experimentální fáze se může ukázat, že některé snímače nejsou vhodné, nebo by bylo žádoucí k sondě připojit další snímače pro duplicitní měření. Na základě této skutečnosti je vyvedeno rozhraní UART (konektor J3), pro něž není plánována měřicí funkce, a rozhraní I²C (konektor J8), které je společné pro všechny snímače atmosférických veličin.

V souhrnu je tedy potřeba takový mikrokontrolér, který disponuje minimálně 2 rozhraními UART, 2 rozhraními I²C, rozhraním SPI a několika GPIO. Zvolený mikrokontrolér by měl mít napájecí napětí 3,3 V a nízkou spotřebu. Díky volbě ukládání dat na paměťovou kartu, není potřeba, aby mikrokontrolér disponoval flash pamětí s velkou úložnou kapacitou. Ta bude užita jen pro zápis programu, uložení konstant a jednoduché konfigurace.

Na základě zmíněných kritérií byl zvolen mikrokontrolér *STM32L151CBT6A*, který se vyznačuje následujícími vlastnostmi [64]:

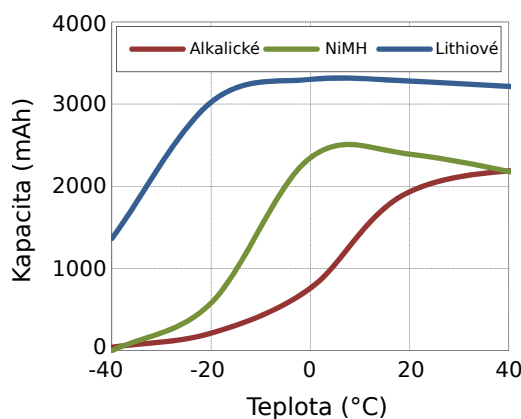
- spotřeba $1,11 \mu\text{A}$ v pohotovostním režimu s využitím RTC,
- 32bitové jádro *ARM[®] Cortex[®]-M3* schopné pracovat na frekvencích v rozsahu 32 kHz až 32 MHz,
- 128 kB flash paměti,
- 32 kB SRAM,
- 2 rozhraní SPI,
- 2 rozhraní I²C,
- 3 rozhraní USART,
- 12bitové ADC na 14 kanálech.

5.1.10 Zdroj napájení

Výběr vhodného zdroje energie není vzhledem k provozním teplotám a hmotnostním omezením prvoplánově jednoduchý úkol. Využití solárních panelů pro napájení sondy není z pohledu absence stabilního přísunu slunečního záření při průletu oblačností nebo mlhou vhodné. Použití jiných zdrojů přírodní energie je rovněž omezeno. Na základě předešlých úvah je proto nezbytné vybavit sondu akumulátorem. Nabízí se využití standardních typů, jako jsou „tužkové“ AA, AAA, případně „knoflíkové“ CR2032, CR2025.

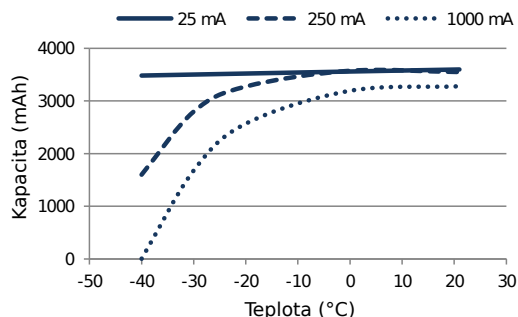
Baterie

Jelikož se se snižující teplotou snižuje i kapacita akumulátorů, je třeba vybrat takový typ, jenž je teplotně co nejvíce stálý. Jak je vidět na obrázku 5.6, který znázorňuje vliv teploty na lithiové, alkalické a niklové baterie typu AA při odběru 250 mA, bezesporu nejlepší volbou jsou lithiové baterie, které si při teplotě -40°C a odběru 250 mA udrží kapacitu přibližně 1350 mAh.



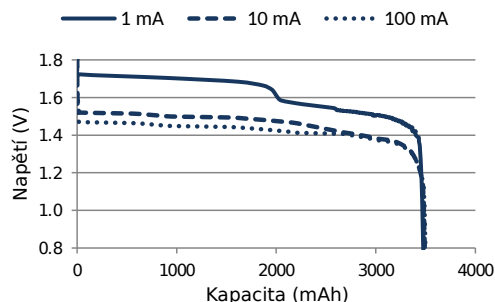
Obrázek 5.6: Vliv teploty na vybrané typy baterií, převzato z [15].

Na základě prezentovaných poznatků byly vybrány baterie *Energizer Ultimate Lithium*, jež mají pracovní teplotu v rozsahu -40°C až $+60^{\circ}\text{C}$. Závislost kapacity baterie na odebraném proudu s přihlédnutím k pracovní teplotě zobrazuje graf 5.7.



Obrázek 5.7: Závislost kapacity baterie *Energizer Ultimate Lithium* na odebraném proudu s přihlédnutím k pracovní teplotě, převzato z [16].

Baterie mají při hmotnosti 15 g kapacitu 3 500 mAh. Závislosti napětí baterie na odebraném proudu zobrazuje graf 5.8.



Obrázek 5.8: Závislosti napětí baterie *Energizer Ultimate Lithium* na odebraném proudu, převzato z [16].

Odhadovaná spotřeba sondy

Díky uvážlivé volbě snímačů dosahují obvody pro snímání všech veličin nízkého provozního odběru, jenž při uvážení nepřetržitého snímání činí 4,929 mA. Samotný mikrokontrolér má dle technického listu při provozní frekvenci 4,194 MHz deklarovaný odběr 775,89 μA [64]. Příjem pozicních dat zajišťuje GNSS přijímač *MAX-M8Q-0* s maximálním odběrem 67 mA doplněn o aktivní anténu s odběrem až 10 mA. Rádiový modul pro svůj provoz vyžaduje 20 mA. Nejnáročnější komponentou z pohledu odběru proudu je však paměťová karta, která vyžaduje až 75 mA pro zápis dat [56].

V součtu tedy činí odhad při plném provozu 176,929 mA, což při uvážení stabilizátoru napětí s průměrnou účinností 85 % odpovídá odběru sondy přibližně 200 mA. Při odhadovaném odběru 200 mA můžeme dle grafu 5.7 prohlásit, že kapacita jedné baterie při teplotě -40°C bude přibližně 2 000 mAh. To by mělo stačit až na 10 hodin provozu aerologické sondy.

Je možné odhadovat dobu letu sondy včetně jejího návratu na padáku na několik hodin. Je žádoucí sondu vybavit až 2 bateriemi tak, aby byl zajištěn její provoz s velkou rezervou. To umožňuje vysílání polohových dat co nejdéle a tím zvýšení šance na její nalezení v terénu. Velká rezerva je zvolena také proto, aby bylo možné sondu v budoucnu dovybavit dalšími snímači s vyššími nároky na napájení.

5.1.11 Napájecí obvod

Napájecí obvod mění úroveň napětí na bateriích na provozní napětí aerologické sondy 3,3 V. Dle vypočítané spotřeby sondy budou zapotřebí dvě baterie *Energizer Ultimate Lithium* v sériovém zapojení. Jak je uvedeno v grafu 5.8, při malém odběru může napětí na monočládku dosahovat hodnot 1,7 V a těsně před vybitím hodnot 1,2 V. V sériovém zapojení dvou baterií dosáhneme vstupního napětí v rozsahu 2,4–3,4 V. Jelikož výstupní napětí napájecího obvodu má být 3,3 V, je požadován takový DC-DC¹² měnič, jenž je schopen měnit úroveň napětí v obou směrech, tj. měnič typu „buck-boost“.

Dle požadovaných parametrů byl vybrán obvod *TPS63001DRCT*, který má interně nastaveno výstupní napětí, a proto jej není nutné nastavovat napětovým děličem dle doporučeného schématu. Uvedený obvod očekává vstupní napětí v rozsahu 1,8–5,5 V, což nám dovoluje v případě potřeby sondu vybavit i například třemi bateriemi v sériovém zapojení. Výstupní proud dosahuje až 800 mA v režimu *boost*, čímž je zajištěna dostatečná rezerva, která má zabránit přetížení obvodu [68].

Celkový obvod spínaného zdroje zahrnuje pracovní cívku, vstupní a výstupní vyrovnávací kondenzátory dle doporučeného schématu a výstupní dolnofrekvenční propust pro potlačení nežádoucího rušení, tzv. Pi článek tvořený feritovým korálkem a dvěma kondenzátory. V souhrnu je váha použitých součástí pro regulaci napětí 0,34 g.

5.2 Konstrukce sondy

Konstrukční řešení aerologické sondy je podstatnou součástí návrhového procesu, protože značně ovlivňuje přesnost měřených atmosférických dat. Z obecného hlediska se jedná především o zabezpečení dostatečného proudu vzduchu okolo snímačů při zachování co nejlepší tepelné izolaci sondy a při dostatečném odstínění snímačů od slunečního záření. To by svým působením zahřívalo mimo jiné snímače, které by tak nemusely poskytovat věrohodné výsledky měření.

Aby byl zajištěn co nejspolehlivější příjem GNSS dat, je nutné GNSS anténu umístit do horní části sondy pro co nejlepší výhled na oblohu, a tím i na satelity. Stejně tak je nutné, aby byla anténa pro rádiovou komunikaci s pozemní stanicí situována ve spodní části aerologické sondy. Těmto a dalším podmínkám je nutné přizpůsobit celý návrh DPS.

5.2.1 Deska plošného spoje

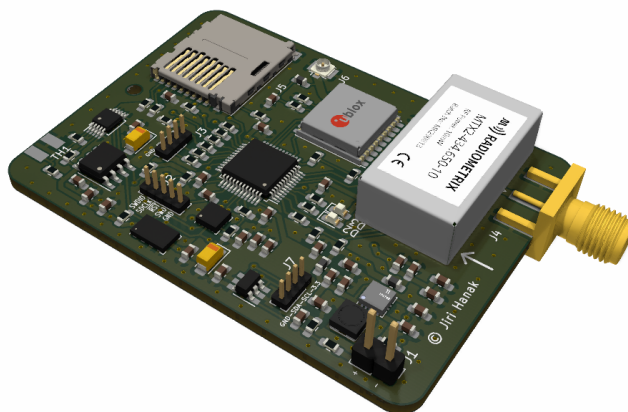
Deska plošného spoje byla navržena v otevřeném multiplatformním softwaru KiCad¹³, přičemž návrh respektoval návrhová pravidla jednotlivých použitých komponent, kterými jsou kupříkladu šířky vodičů, impedance vodičů, izolační mezery, prázdné zóny, délky vodičů a další. Při návrhu samotné DPS bylo nutné znát některé výrobní parametry, kterými jsou tloušťka substrátu, tloušťka měděné vrstvy a relativní permitivita, neboť od nich se mimo

¹²DC-DC – převodník stejnosměrného napětí na stejnosměrné napětí jiného potenciálu.

¹³<https://www.kicad.org>

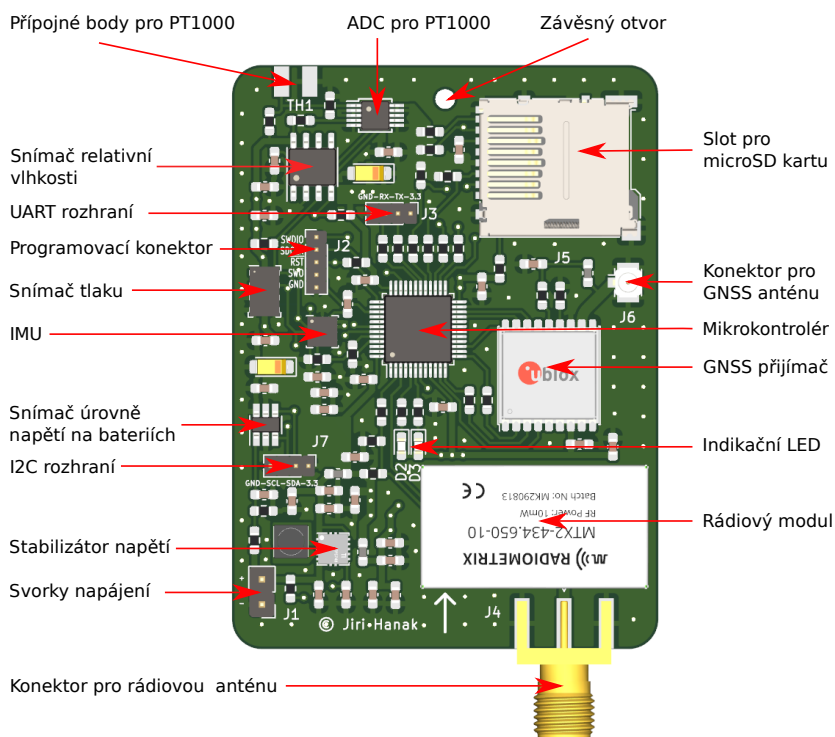
jiné odvíjí impedance vedení, která musí být $50\ \Omega$ pro rádiovou komunikaci. K výpočtu byl použit vestavěný kalkulátor ve výše zmíněném software.

Schéma sondy je uvedeno v příloze D a návrh DPS v příloze E. Trojrozměrná vizualizace výsledné DPS aerologické sondy byla vyhotovena totožným softwarem a je zobrazena na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9: Trojrozměrná vizualizace osazené desky plošného spoje sondy.

Na obrázku 5.10 je pro lepší povědomí o rozmístění jednotlivých snímačů a obvodů na DPS uvedena vizualizace DPS s vyznačením jednotlivých komponent.



Obrázek 5.10: Vyznačení jednotlivých komponent sondy.

5.2.2 Obal aerologické sondy

Ve světle zkušeností z provozování aerologických měření pomocí sond se jako nejlepší řešení jeví umístit DPS do polystyrenového boxu světlé barvy. Minimální tloušťka stěny obalu větší než 1 cm vytvoří ochranu snímačů před přímým slunečním zářením. Takové řešení současně umožňuje pohlčení části kinetické energie při dopadu. Obal bude tepelně izolovat rádiové moduly od mrazivého okolí ve vyšších vrstvách atmosféry, a to vše při minimálním nárůstu hmotnosti. V samotném obalu je nutné mít vzduchový tunel, skrz který bude proudit vzduch okolo snímačů.

Na míru vytištěný plastový obal může sloužit především jako kryt před slunečním zářením, ale kvůli své tvrdosti by neumožnil pohltit tolik kinetické energie při dopadu tak, jako je to možné u zmíněného polystyrenu. Izolační účinky 3D tištěného obalu by byly při zachování celkové hmotnosti horší.

5.3 Výběr komponent pozemní stanice

Návrh pozemní stanice je oproti návrhu sondy jednodušší, protože jej není zapotřebí intenzivně optimalizovat z hlediska váhy, tepelné odolnosti, rozměrů a spotřeby. Na druhou stranu by se měly zmíněné parametry pohybovat v rozumných mezích, aby stanice disponovala vhodnou mírou mobility umožňující sledování sondy v terénu. Při ponechání pozemní stanice u místa vypuštění by se mohla sonda dostat od stanice na takovou vzdálenost, při které by již stanice nebyla schopna přijímat vysílaná data.

Ačkoli by bylo možné navrhnout pozemní stanici stejným způsobem jako sondu, tj. navrhnout DPS s řídicím mikrokontrolérem a patřičnou periferií, z pohledu fungování platformy by to nepřineslo výraznější užitek. Dokonce by se tím zvýšila závislost na dodávaných komponentách. Na základě uvedeného bylo rozhodnuto, že jádrem pozemní stanice bude některý z již dostupných jednodeskových počítačů.

Výhodou takového počítače je univerzální napájení v podobě 5 V přes USB, díky čemuž je jej možné napájet běžnými adaptéry ze síťového napětí 230 V střídavých, případně powerbankou o požadované kapacitě dle předpokládané doby sledování.

5.3.1 Přijímací modul

Stanice může přijímat rádiový signál především dvěma způsoby, a to:

- přijímací modul nastavený na definované frekvenci — v našem případě by to byl modul komplementární k *Radiometrix MTX2*, tj. *Radiometrix NRX2B* na společné frekvenci $f = 434,650$ MHz, zobrazený na obrázku 5.11,
- univerzální přijímací modul se softwarově definovanou frekvencí — zařízení označované názvem *Software-Defined Radio* (SDR), ve kterém je možné pomocí vhodného software určit rozsah přijímaných frekvencí.

Ačkoli se tato práce zabývá návrhem platformy pro aerologická měření, neužívá vyhrazené rádiové pásmo pro tyto účely, jelikož by to mimo jiného vyžadovalo přidělení konkrétní frekvence od ČTÚ. To by v případě nadšenců, kteří by chtěli zreplikovat výše popsané řešení, mohlo představovat nezdolatelnou překážku.

Modul pro příjem *Radiometrix MTX2* v tomto případě je jednoúčelový se svojí cenou 1 065,55 Kč¹⁴ [50], přičemž univerzální přijímač pro SDR *RTL-SDR BLOG V3* uvedený

¹⁴Ke dni 18. 3. 2021 s původní cenou £35,85



Obrázek 5.11: Modul pro příjem rádiového signálu *Radiometrix MTX2*, převzato z [50].

na obrázku 5.12 se svojí cenou 587,13 Kč¹⁵ [53] představuje rozumnější volbu, a proto následující řešení bude uvažovat příjem rádiové komunikace pomocí *RTL-SDR BLOG V3*. Daná volba je vhodná mimo jiné vzhledem ke skutečnosti, že se může vysílací frekvence vlivem nízkých teplot lišit od definované, a proto by *Radiometrix NRX2B* nemusel zachytit zasílaná data.



Obrázek 5.12: Adaptér pro příjem rádiového signálu, převzato z [52].

5.3.2 Příjem signálu

Díky zvolenému způsobu příjmu dat je možné využít aplikaci určenou pro analýzu rádiového signálu *FLdigi*, nebo její nadstavbu upravenou speciálně pro sledování balónů *dl-fldigi*. V následujícím textu jsou uvedeny klíčové informace o potřebném software, přičemž z důvodu komplexnosti jednotlivých aplikací a jejich univerzálnosti je čtenář ve většině případů odkázán na patřičné vyčerpávající popisy a návody.

Pro příjem signálu je však nejprve nutné nainstalovat patřičné ovladače, přičemž kompletní návody pro operační systémy *Windows* a *Linux* jsou uvedeny na webových stránkách výrobce¹⁶. Pro operační systém *Rasbian* je uvedena posloupnost úkonů k instalaci *RTL-SDR* v repositáři¹⁷. Dané postupy jsou uvedeny pro konkrétní zařízení *RTL-SDR BLOG V3*, avšak daný ovladač *RTL-SDR* je použitelný pro více rádiových SDR modulů, dokonce pro DVB-T adaptéry založené na demodulátoru *Realtek RTL2832U*.

¹⁵Ke dni 18. 3. 2021 s původní cenou \$27,95

¹⁶<https://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-quick-start-guide/>

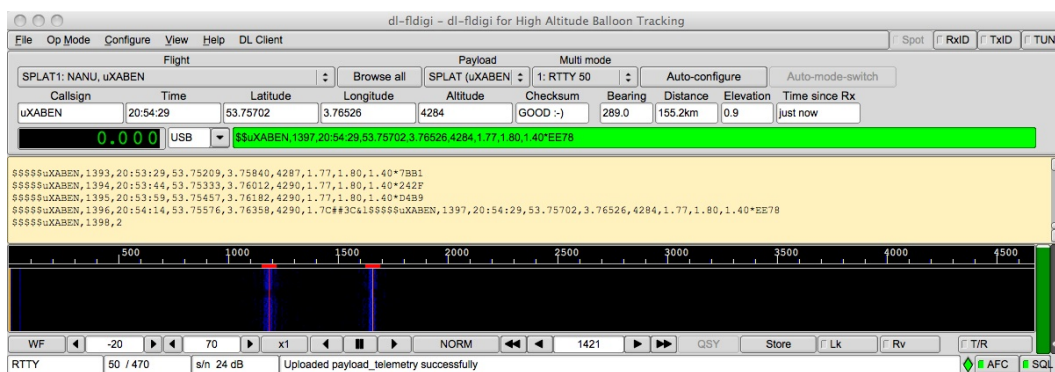
¹⁷<https://gist.github.com/floehopper/99a0c8931f9d779b0998>

Nástroj dl-fldigi

Nástroj dl-fldigi je adaptovanou verzí nástroje FLdigi, jež slouží k dekodování signálu ze zvukových karet. Rozšíření dl-fldigi spočívá v tom, že dekoduje signál vyslaný sondou a přijímanou telemetrii zaslá v reálném čase na server¹⁸ popsany v sekci 5.1.7, díky čemuž může být poloha dostupná více uživatelům, přičemž při správné konfiguraci dl-fldigi server zobrazuje i aktuální polohu stanice, což je velmi vhodné pro hledání sondy v otevřeném prostoru.

Po připojení k internetu si automaticky z daného serveru stáhne seznam dostupných konfiguračních dokumentů nákladů (sond), díky čemuž je možné v hlavním okně vybrat naši sondu a spustit automatickou konfiguraci.

Náhled na hlavní okno aplikace s ukázkou přijímaného signálu je uveden na obrázku 5.13.



Obrázek 5.13: Hlavní okno aplikace dl-fldigi, převzato z [74].

5.3.3 Jednodeskový počítač

Mezi nejběžnější jednodeskové počítače můžeme zařadit *Raspberry Pi*, *Orange Pi* a *Banana Pi*. Jelikož hlavním aspektem výběru vzhledem k způsobu přijímání dat je dispozice USB portu, není výběr takřka omezen, a volba výsledného počítače je ponechána na uživateli, neboť všechny zmíněné počítače nabízí modely, jež podporují operační systém *Ubuntu*, na kterém lze zprovoznit výše zmíněné aplikace. Zmíněné počítače ve většině případů disponují minimálně rozhraním Wi-Fi, ideálně i Ethernet portem.

Při zvolení *Raspberry Pi*, je možné využít operační systém *Raspbian*¹⁹, který má ve svých repositářích všechny potřebný software a instalace je pak složena jen z několika málo úkonů²⁰. Je nutné podotknout, že zmíněné počítače potřebují ke svému fungování i zobrazovací jednotku (display), kdy lze s výhodou pro *Raspberry Pi* užít specializovaný 7palcový dotykový display²¹.

Alternativou může být využití notebooku, který většinou poskytuje pohodlné pracovní prostředí, avšak jeho výdrž na akumulátoru by mohla být v terénu limitující.

¹⁸<http://habitat.habhub.org>

¹⁹<https://www.raspberrypi.org/software/>

²⁰<https://ukhas.org.uk/projects/dl-fldigi:install-raspbian>

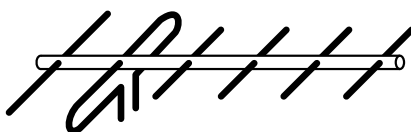
²¹<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-touch-display/>

5.3.4 Anténa

Vzdušná vzdálenost mezi sondou a pozemní stanicí může být několik desítek kilometrů, a proto tomu musí být přizpůsobena i přijímací část stanice – anténa.

Přijímací anténa by měla být směrová s co největším ziskem, neboť zisk je nepřímo úměrný činiteli směrovosti antény [45]. Směrovou anténu je možné použít především proto, že můžeme odhadnout přibližnou trajektorii letu na základě aktuálně panujících meteorologických podmínek²², a díky tomu ji směřovat přímo ke stoupající sondě. Azimut vůči sondě lze rovněž určit z aktuální polohy stanice a přijímaných dat ze sondy.

Velmi rozšířený typ směrové antény pro metrové a decimetrové vlny, kam spadá ISM pásmo 433 MHz, je tzv. Yagiho anténa s podélným vyzařováním, která je znázorněná na obrázku 5.14. Anténa se skládá z reflektoru, skládaného dipólu a direktorů, jejichž počet výrazně ovlivňuje zisk antény, který bývá obvykle v rozsahu 10–15 dBi [45].



Obrázek 5.14: Yagiho anténa s podélným vyzařováním.

Danou anténu se ziskem 12,2 dBi lze zakoupit v obchodě²³, případně vyrobit dle návodu²⁴, neboť tento typ antény pro 433 MHz není zcela běžně k dostání.

5.4 Implementační detaily

Celý firmware softwarového řešení je psán v jazyce C s využitím knihoven k danému mikrokontroléru a mezivrstvy²⁵ pro přístup k FatFs²⁶.

5.4.1 Konfigurace mikrokontroléru

Firmware mikrokontroléru byl inicializován pomocí multiplatformního grafického nástroje STM32CubeMX²⁷ od společnosti *STMicroelectronics*. Daný nástroj slouží k inicializaci a současně nabízí přehled dostupných mikrokontrolérů a vývojových kitů od společnosti *STMicroelectronics* s možností výběru produktů na základě požadovaných parametrů, přičemž nabízí ucelený přehled o jednotlivých produktech s odkazy na technické manuály. [61]

Po výběru konkrétního mikrokontroléru umožňuje nastavit komunikační rozhraní s požadovanými parametry, přidělení funkcí na konkrétní piny mikrokontroléru, pracovní frekvenci, nastavení časovačů, přerušení a mnoho dalšího. Náhled na přidělené funkce pinům mikrokontroléru je uveden na obrázku 5.15.

Nástroj umožňuje volbu míry abstrakce generovaného kódu pro jednotlivé ovladače mezi knihovnou HAL (Hardware Abstract Layer) s velkou mírou abstrakce, nebo knihovnamy LL

²²<http://predict.habhub.org>

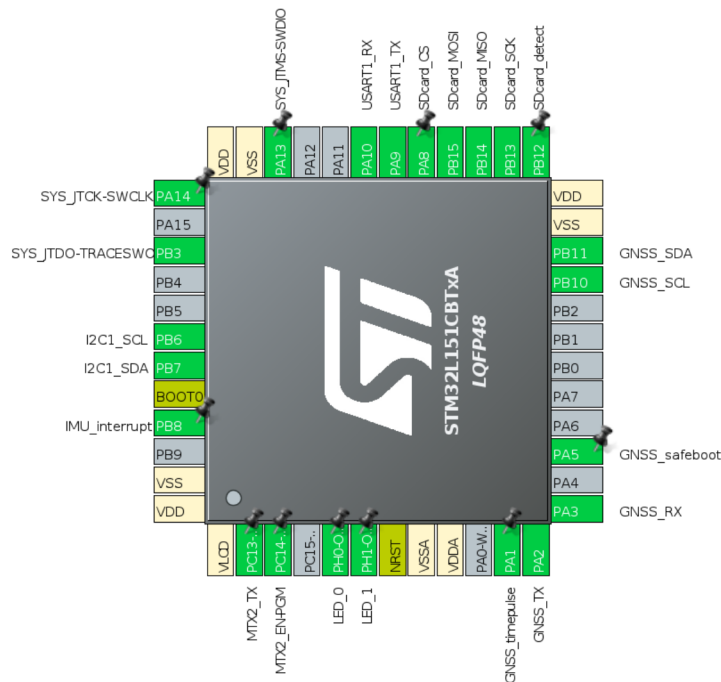
²³<http://www.antena.cz/antena-vaten-433-8-pro-pasmo-433-mhz-zisk-12-2-dbi-p34489/>

²⁴<http://expedicebilytesak.sweb.cz/technika/anteny/7el-Yagi.htm>

²⁵<https://github.com/kiwih/cubeide-sd-card>

²⁶http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html

²⁷<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>



Obrázek 5.15: Náhled na přidělené funkce pinům mikrokontroléru.

(Low Level) s malou mírou abstrakce, přičemž byla zvolena knihovna HAL. Podrobný soupis všech funkcí dané knihovny, ze kterého bylo čerpáno, je uveden v [63].

5.4.2 Programování mikrokontroléru

Společnost *STMicroelectronic* rovněž nabízí i multiplatformní nástroj pro samotné programování mikrokontroléru *STM32CubeProgrammer*²⁸, který dle potřeby nabízí grafické či textové rozhraní, které je velmi užitečné při automatické aktualizaci firmwaru mikrokontrolérů po jeho přeložení. Nástroj mimo jiné umožňuje čtení, zápis, mazání a verifikaci paměti mikrokontroléru i externích pamětí přes rozhraní JTAG a SWD [62].

Mikrokontrolér je však nutné nejdříve fyzicky připojit k počítači a pomocí *ST-LINK*²⁹ nebo jiných programátorů.

Nahrání nové verze firmwaru mikrokontroléru se provádí pomocí příkazu:

```
STM32_Programmer_CLI -c port=SWD reset=HWrst -w main.bin 0x08000000 -v -rst
```

který skrz rozhraní SWD zapíše soubor *main.bin* na adresu *0x08000000*, ověří zápis a provede hardwarový reset mikrokontroléru. Podrobný popis všech parametrů je dostupný skrz parametr *-h*.

5.4.3 Obsluha snímačů a modulů

Pro snížení náročnosti výpočtů jednotlivých veličin při zohlednění architektury mikrokontroléru, jsou jednotlivé výpočty prováděny nad celočíselnými datovými typy, přičemž

²⁸<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeprog.html>

²⁹<https://www.st.com/en/development-tools/stlink-v3set.html>

jsou pevně dány přesností jednotlivých výsledků, tj. interně jsou používány veličiny vynásobené mocninami 10, a až při vytváření výstupu výsledků jsou dané veličiny těmito mocninami poděleny pro získání celých částí výsledků a modulovány pro získání zvoleného množství desetinných míst.

Měření teploty pomocí PT1000

Měření teploty je prováděno pomocí ADC *MCP3423* o dvou kanálech, jeden pro měření úbytku napětí na *PT1000-550* a druhý pro měření napájecího napětí děliče tvořeného *PT1000-500* s předřadným rezistorem. Daný převodník umožňuje měřit v kontinuálním režimu, kdy cyklicky opakuje měření, případně v režimu jednoho měření, po kterém přejde do režimu spánku. Protože nelze oba kanály měřit současně, nemá význam použít kontinuální režim.

Měření úbytku napětí na *PT1000-550* je zahájeno vysláním konfiguračního bytu, který nastaví ADC do následující konfigurace:

- nastavení bitu *připraven*,
- výběr kanálu 1,
- režim jednoho měření,
- vzorkovací frekvence 15 Hz,
- nezesílený vstupní signál.

Po dokončení zmíněného měření je nutné zahájit sekvenci čtení datových bytů s konfiguračním bytem, který indikuje dokončené měření a přijaté datové byty jsou validní. Počet datových bytů je závislý na vzorkovací frekvenci, a tím i na přesnosti naměřených hodnot.

Jakmile jsou přečtena validní data z měření úbytku napětí na *PT1000-550*, je možné pokračovat měřením napájecího napětí, které je zahájeno vysláním obdobného konfiguračního bytu, avšak s výběrem kanálu 2. Naměřené napětí odpovídá polovině napájecího napětí, neboť byl použit dělič napětí se souměrným dělicím poměrem.

Reálná rezistivita *PT1000-550* je vzápětí vypočtena dle vztahu (5.2). Tato hodnota je použita jako index do předvypočítané tabulky reálných hodnot teplot dle rezistivity *PT1000-550* vypočítaných dle rovnic (2.1a) a (2.1b), přičemž tabulka obsahuje rezistivity pro teploty v rozsahu od -60°C do $+40^{\circ}\text{C}$.

Měření napětí na baterii

Napětí na baterii je snímáno jen jedním kanálem ADC *MCP3421*, a proto je možné využít totožný způsob měření, který je použit pro snímání úbytku napětí na *PT1000-550*, avšak díky použitému děliči napětí je nutné výslednou hodnotu vynásobit 2.

Měření atmosférického tlaku

Snímač atmosférického tlaku *MSP5611* je ve výchozím stavu v režimu spánku. Pro zahájení měření je nutná inicializace pomocí příkazů. Snímač umožňuje měřit jak atmosférický tlak, tak i teplotu, podle které se naměřené hodnoty kompenzují. Proto je nutné měřit obě veličiny. Veličiny nelze měřit paralelně, nýbrž sekvenčně zasláním příkazu pro měření konkrétní veličiny s výsledným vyčkáním na její doměření, zasláním příkazu na čtení hodnoty

z interního ADC a přečtením 24bitové hodnoty. Pro druhou veličinu je uvedený postup podobný, avšak s odlišnými příkazy pro měření. Pro získání přesné měřené hodnoty je u obou měření využito maximální dostupné převzorkování 4 096.

Daný snímač je z výroby kalibrován na dvě teplotní a dvě tlakové úrovně, jejichž výsledkem je 6 kalibračních hodnot, které je nezbytné před samotným měřením přečíst, neboť s jejich pomocí se dopočítávají reálné hodnoty. Označíme-li kalibrační hodnoty proměnnými C_1 – C_6 , naměřenou teplotu t_r a tlak p_r , je pro výpočet rozdílu mezi aktuální teplotou a referenční teplotou Δ_t užít vztah (5.4a), pro výpočet teploty t (5.4b), pro výpočet posunu tlaku při aktuální teplotě p_o (5.5a), pro citlivost tlaku při aktuální teplotě p_s (5.5b), a pro výpočet tlaku p (5.5c) [66].

$$\Delta_t = t_r - C_5 \cdot 2^8 \quad (5.4a)$$

$$t = 2\,000 + \frac{\Delta_t \cdot C_6}{2^{23}} \quad (5.4b)$$

$$p_o = C_2 \cdot 2^{16} + \frac{C_4 \cdot \Delta_t}{2^7} \quad (5.5a)$$

$$p_s = C_1 \cdot 2^{15} + \frac{C_3 \cdot \Delta_t}{2^8} \quad (5.5b)$$

$$p = \frac{\frac{p_r \cdot p_s}{2^{21}} - p_o}{2^{15}} \quad (5.5c)$$

Je-li teplota menší než 20°C , je navíc nutné užít pro kompenzaci teploty vztah (5.6). Pro teplotní kompenzaci atmosférického tlaku jsou uvedeny vztahy (5.7a) a (5.7b). Pro případ teploty menší než -15°C jsou pak užity vztahy (5.8a) a (5.8b) [66].

$$t = t - \frac{\Delta_t}{2^{31}} \quad (5.6)$$

$$p_o = p_o - 5 \cdot \frac{(t - 2\,000)^2}{2} \quad (5.7a)$$

$$p_s = p_s - 5 \cdot \frac{(t - 2\,000)^2}{4} \quad (5.7b)$$

$$p_o = p_o - 5 \cdot \frac{(t - 2\,000)^2}{2} + 7 \cdot (t + 1\,500)^2 \quad (5.8a)$$

$$p_s = p_s - 5 \cdot \frac{(t - 2\,000)^2}{4} + 11 \cdot \frac{(t + 1\,500)^2}{2} \quad (5.8b)$$

Samotný výpočet je níže uveden i ve zjednodušené formě v jazyku C. Vypočítané hodnoty jsou stokrát větší než hodnoty reálné tak, aby bylo dosaženo přesnosti na 2 desetinná místa při využití celočíselného datového typu:

```

1 void compute_pressure(
2     int32_t *pressure, int32_t *temperature, uint16_t calibration[6],
3     uint32_t raw_pressure, uint32_t raw_temperature) {
4
5     int64_t dT, t2 = 0;
6     int64_t off, off2 = 0;
7     int64_t sens, sens2 = 0;
8
9     dT = raw_temperature - ((uint32_t)calibration[4] << 8);
10    *temperature = 2000 + (((int64_t)dT * calibration[5]) >> 23);
11
12    off = ((int64_t)calibration[1]) << 16;
13    off += ((int64_t)calibration[3] * dT) >> 7;
14    sens = ((int64_t)calibration[0]) << 15;
15    sens += ((int64_t)calibration[2] * dT) >> 8;
16
17    if (*temperature < 2000) {
18        t2 = (dT * dT) >> 31;
19        off2 = 5 * ((*temperature - 2000) * (*temperature - 2000)) >> 1;
20        sens2 = 5 * ((*temperature - 2000) * (*temperature - 2000)) >> 2;
21    }
22
23    if (*temperature < -1500) {
24        off2 += 7 * (*temperature + 1500) * (*temperature + 1500);
25        sens2 += 11 * ((*temperature + 1500) * (*temperature + 1500)) >> 1;
26    }
27
28    off -= off2;
29    sens -= sens2;
30
31    *temperature -= t2;
32    *pressure = (((int64_t)raw_pressure * sens) >> 21) - off) >> 15;
33 }

```

Měření relativní vlhkosti vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu je měřena pomocí snímače *HHH8131*, který je za obvyklých okolností v režimu spánku. Pro zahájení měření je nutné snímači zaslat příkaz. Hodnoty registrů naměřených hodnot je možné kdykoli přečíst, neboť obsahují i bity, jež značí, zda-li jsou čtená data aktuální, nebo měření ještě nebylo dokončeno a je třeba dané registry přečíst později.

Validní data obsahují ve čtyřech bytech mimo jiné také 14bitové surové hodnoty pro relativní vlhkost vzduchu H_r a teplotu vzduchu t_r . Pro reálné hodnoty je třeba použít rovnice (5.9) a (5.10) [22].

$$H = \frac{H_r}{2^{14} - 2} \cdot 100 \quad (5.9)$$

$$t = \frac{t_r}{2^{14} - 2} \cdot 165 - 40 \quad (5.10)$$

Měření zrychlení a rychlosti rotace

Zrychlení v osách x , y , z a úhlové rychlosti kolem těchto os jsou měřeny pomocí IMU *ICM-20608-G*. V prvním kroku je IMU resetovaná do výchozího nastavení zasláním resetovacího bitu v registru *Power Management 1* (**0x6B**). Ve stejném registru je po uplynutí určité doby po provedení restartu vybrán zdroj hodin, který probudí samotné zařízení.

Nastavení akcelerometru je provedeno v registru *Accelerometer configuration 2* (**0x1C**) volbou rozsahu $\pm 8g$, a v registru *Accelerometer configuration 2* (**0x1D**) průměrování výsledku ze 4 vzorků. Gyroskop je nastaven v registru *Gyroscope configuration* (**0x1B**) pro rozsah $\pm 250^\circ \text{s}^{-1}$. Jelikož je IMU navržena na mnohem větší vzorkovací frekvence, jsou vnitřní registry aktualizovány frekvencí 1 kHz. Protože se budou odečítat naměřené hodnoty s menší frekvencí, je nastaven dělič vzorkovací frekvence v registru *Sample rate divider* (**0x19**) na hodnotu 1+19.

Surové hodnoty zrychlení jsou čteny z 8bitových registrů **0x59–0x64**, teplota IMU z registrů **0x65–0x66** a úhlové rychlosti z registrů **0x67–0x72**, přičemž každá veličina je zastoupena 2 registry a souhrnně tvoří 16bitovou hodnotu. Naměřené hodnoty jsou následně poděleny zvoleným rozsahem. Přehled všech registrů s jejich významy je uveden v dokumentaci [34].

Obsluha GNSS přijímače

Polohová data s doplňkovými informacemi jsou přijímána z modulu *U-Blox MAX M8Q* prostřednictvím rozhraní UART na frekvenci 1 Hz. GNSS přijímač na této frekvenci zasílá NMEA protokolem mimo jiné věty **GLL** a **RMC**, ze kterých jsou vyčteny všechny potřebné údaje. Vysílání ostatních druhů vět bylo deaktivováno proprietárními větami **PUBX, 40**, jejichž přehled je uveden v [73].

Jelikož příjem probíhá automaticky, s přijetím každého bytu je vyvoláno přerušení, při kterém je byte uložen do bytového pole, přičemž je byte kontrolován na hodnotu **0x0A** (konec řádku), při kterém se inkrementuje čítač přečtených řádků. Dané řádky jsou zpracovávány v hlavní programové smyčce, kdy jsou z nich vyčteny všechny potřebné hodnoty.

Daný GNSS přijímač pro výpočet výsledků používá vždy jeden z 10 dynamických modelů. Modely se liší mimo jiné v dosažitelné přesnosti výsledků, ale také v maximální možné nadmořské výšce. Jelikož ve výchozím nastavení je užit model pro přenosnou platformu s maximální možnou nadmořskou výškou 12 km, je nutné jej zaměnit za jeden z modelů s maximální nadmořskou výškou 50 km. Daná změna je možná pouze pomocí **UBX** protokolu, jehož příkazy je možné si předpřipravit v evaluačním software *u-center*³⁰. Přehled dostupných dynamických modelů s vybranými parametry, jež značí maximální hodnoty, je uveden v tabulce 5.4 [73].

³⁰<https://www.u-blox.com/en/product/u-center>

Tabulka 5.4: Přehled dynamických modelů GNSS přijímače, převzato z [73].

Platforma	Výška (m)	Horizontální rychlost (m s ⁻¹)	Vertikální rychlost (m s ⁻¹)	Odchylna pozice
Přenosná	12 000	310	50	střední
Stacionární	9 000	10	6	malá
Chodec	9 000	30	20	malá
Zápěstí	9 000	30	20	střední
Kolo	6 000	100	15	střední
Auto	6 000	100	15	střední
Na moři	500	25	5	střední
Ve vzduchu < 1 g	50 000	100	100	velká
Ve vzduchu < 2 g	50 000	250	100	velká
Ve vzduchu < 4 g	50 000	500	100	velká

Obsluha rádiového vysílače

Vysílání rádiového signálu musí být nezávislé na hlavní programové smyčce, protože může trvat i několik sekund. Zpráva určená k vyslání je zhotovena v hlavní programové smyčce, která je následně uložena do vyrovnávací paměti, ze které se cyklicky na základě přerušení vyvolaného časovačem `tim10` vybere jeden byte. Ten reprezentuje logickou 0 či 1. Podle toho se nastaví logická úroveň na pinu 2, který přímo řídí vysílání modulu *Radiometrix MTX2*.

Časovač je nastaven na 50 Hz, tj. 50 baudů. To je realizováno pomocí rovnice (5.11), ve které byla dělička vhodně zvolena na hodnotu $c_p = 465$. Ta udává základní frekvenci 9 000 Hz při frekvenci hodin mikrokontroléru $f = 4\,194\,000$ Hz. Čítač periody vychází dle rovnice na $c_T = 179$.

$$f = \frac{f_c}{(c_p + 1) \cdot (c_T + 1)} \quad (5.11)$$

5.4.4 Hlavní programová smyčka

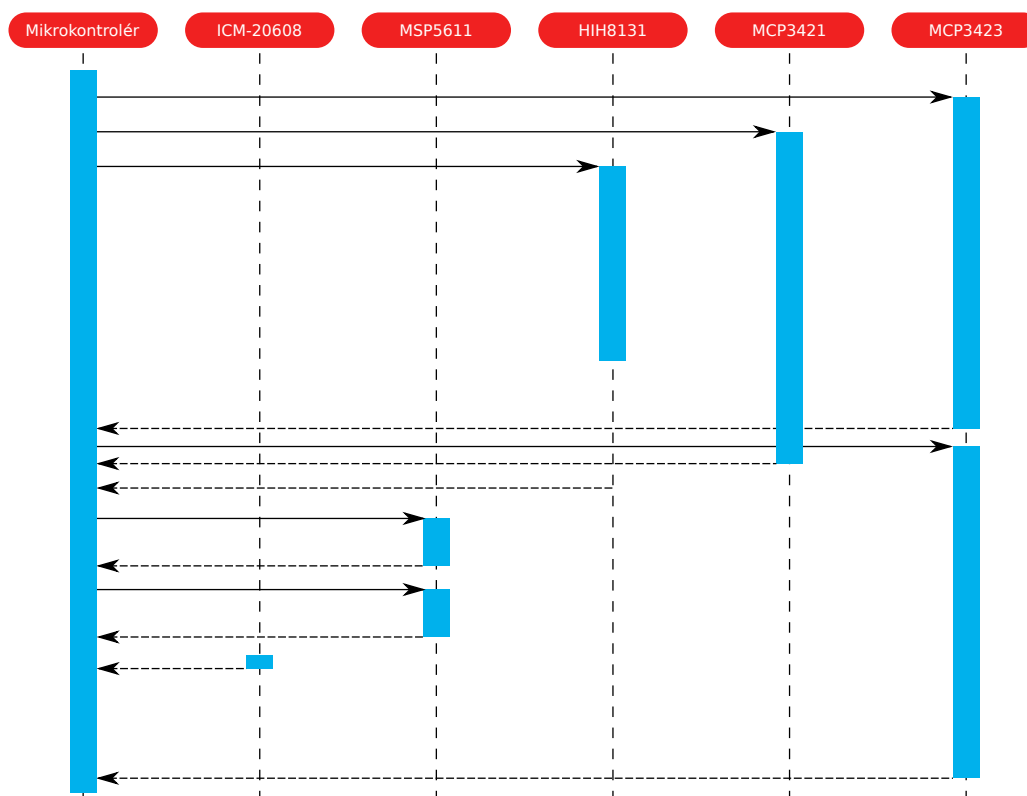
K inicializaci sondy po přivedení napájení se spustí kontrola a nastavování GPIO pinů, komunikačních sběrnic, časovačů, FatFs a také paměťové karty. Po úspěšné inicializaci jsou aktivovány jednotlivé časovače s následujícími funkcemi:

- `tim9` — nastaven na 1 000 Hz, slouží k internímu přehledu o čase,
- `tim10` — nastaven na 50 Hz, na základě jeho přerušení jsou vysílány jednotlivé bity rádiové komunikace,
- `tim11` — nastaven na 0,1 Hz, kontroluje cyklické provádění měřicí sekvence, tj. plní funkci „Watchdog“, v případě detekce zastavení programu provede softwarový restart celého MCU.

Jakmile jsou spuštěny časovače, začne probíhat inicializace snímačů, po níž začne cyklické provádění měřicí sekvence, jejíž jednotlivé běhy jsou ukončovány zápisem naměřených hodnot na paměťovou kartu. Naměřené hodnoty stavových veličin jsou na nízké frekvenci vysílány rádiovou komunikací do pozemní stanice.

Měřicí sekvence

Pro dosažení efektivního využití sběrnice I²C, přes kterou jsou připojené snímače k mikrokontroléru a největších překrytů dob měření jednotlivých snímačů, byla stanovena tzv. měřicí sekvence, která zahrnuje zasílání požadavků měření jednotlivým snímačům a čtení jejich výsledků. Průběh jedné sekvence s využitím typických dob měření je zobrazen v sekvenčním diagramu na obrázku 5.16.



Obrázek 5.16: Sekvenční diagram měřicí sekvence.

5.4.5 Komunikační rozhraní

Sonda indikuje svoji činnost a zpřístupňuje výsledky měření celkem skrz 4 rozhraní. Primární rozhraní je výstup na paměťovou kartu, na kterou jsou ukládány výsledky měření ve formátu uvedeném v příloze C. Stejný formát výsledků měření je souběžně vysílán skrz UART rozhraní, díky kterému je možné číst všechny naměřené hodnoty v reálném čase. Rozhraní je konfigurováno na přenosovou rychlost 115 200 baudů, žádný paritní bit a jeden stop bit. Na rozhraní UART jsou rovněž vypisovány chybové kódy v případě poruchy sondy.

Vybraná množina měřených hodnot je vysílána i prostřednictvím rádiové komunikace. Tato množina zahrnuje položky: Sekvenci, Teplotu vzduchu, Napětí na baterii, Relativní

vlhkost, Teplotu na HIH8131, Atmosférický tlak, Zeměpisnou šířku, Zeměpisnou délku, Nadmořskou výšku, Rychlost na zemi a Azimut.

Posledním rozhraním, které však neposkytuje informace o naměřených hodnotách, je indikace stavu pomocí dvou LED LED0 a LED1. Při startu sondy je uvedena LED0 do trvalého svitu, přičemž po uplynutí nezbytné doby pro inicializaci sondy přejde do režimu přerušovaného svitu s přibližnou frekvencí 1 Hz, nebo do režimu se čtyřnásobnou frekvencí, který značí korektní běh sondy a zároveň příjem GNSS dat. V případě jakékoli poruchy je uvedena LED1 do trvalého svitu, v opačném případě je zhasnuta.

5.5 Souhrn dosažených vlastností

Platforma pro provádění aerologických měření na základě zmíněného podrobného návrhu dosahuje následujících vlastností:

- Platforma snímá základní atmosférické veličiny na frekvenci 4 Hz. Jedná se o teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu a atmosférický tlak a zaznamenává je na paměťovou kartu v textovém formátu CSV.
- Platforma na základě údajů z GNSS přijímače *MAX-M8Q* ukládá rovněž na paměťovou kartu na frekvenci 1 Hz ve formátu CSV údaje o poloze, nadmořské výšce, rychlosti letu a kurzu.
- Elektrickou energii dodávají platformě 2 lithiové baterie *Energizer Ultimate Lithium*, které jsou při provozní teplotě -40°C a odběru sondy 200 mA schopné zajistit její fungování po dobu 20 hodin.
- Platforma bez vysílací rádiové antény váží 69 g. Je opatřena robustním polystyrenovým obalem, který snižuje účinky slunečního záření, zabraňuje podchlazení kritických součástí sondy a snižuje následky při dopadu platformy.
- Indikace stavu platformy je řešena 2 LED.
- Pro budoucí vývoj jsou vyvedena komunikační rozhraní UART a I²C.

Kapitola 6

Experiment pro ověření návrhu platformy

Tato kapitola popisuje relevantní experimenty, díky kterým byla aerologická sonda otestována a prověřena.

6.1 Modelování stoupání balónu

Bylo by nevhodné provést letový experiment bez odhadu chování balónu v atmosféře, tj. bez znalosti přibližné rychlosti stoupání či růstu poloměru balónu. Z tohoto důvodu byl vytvořen dynamický model stoupání meteorologického balónu vzhledem k fyzikálním podmínkám v atmosféře dle ISA, jejíž veličiny jsou především funkcemi atmosférické výšky.

6.1.1 Model atmosféry

Teplota atmosféry je závislá na atmosférické výšce a je počítána dle vztahu (6.1) [13].

$$T = \begin{cases} 216,15 \text{ K} & \text{pro } h \geq 11\,000 \text{ m} \\ 288,15 - 0,0065 \cdot h \text{ K} & \text{pro } h < 11\,000 \text{ m} \end{cases} \quad (6.1)$$

S její znalostí lze dle vztahu (6.2) dopočítat v dané výšce atmosférický tlak, díky kterému lze stanovit i hustotu vzduchu pomocí (6.3), přičemž je nutné uvažovat i reálnou plynovou konstantu pro vzduch $R_a = 287,04 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ [13].

$$p = 101\,325 \cdot \left(1 - 0,0065 \cdot \frac{h}{T}\right)^{5,2561} \quad (6.2)$$

$$\rho_d = \frac{p}{R_a \cdot T} \quad (6.3)$$

6.1.2 Model balónu

Pro stanovení rychlosti stoupání balónu, je nutné znát odpor prostředí (vzduchu). Uvážíme-li ideální případ, kdy je tvar balónu sféra a v atmosféře je bezvětří, balón musí svým pohybem stoupat přes masu vzduchu o určité dynamické viskozitě, jež je závislá na teplotě (6.4). Hodnota dynamické viskozity která značí míru vnitřního tření. Daný vztah je odvozen ze Sutherlandova zákona [41]. Zjednodušení tvaru balónu na tvar sféry je možné,

neboť dle studie [58] dále popsany součinitel odporu c_D , jenž je závislý na tvaru balónu, dosahuje rozdílu v nízkých jednotkách procent.

$$\mu_a = 1,512 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(T + 273,15)^{1,5}}{T + 273,15 + 120} \quad (6.4)$$

Naopak Reynoldovo číslo udává poměr setrvačných sil vůči viskózním silám při znalosti čelní plochy objektu (6.5). Vzhledem ke skutečnosti, že čelní plochy letajících objektů jsou takových tvarů, které minimalizují odpor prostředí, čelní plochou se uvažuje nárys, i když čelní plocha netvoří rovinu [42].

$$Re = \frac{\rho_a r v}{\mu_a} \quad (6.5)$$

Se znalostí Reynoldova čísla lze vypočítat činitel odporu c_D (6.6), který zahrnuje všechny komplexní parametry, kterými jsou tvar objektu a jeho odpor, podmínky proudění vzduchu, a další. Jelikož je závislý na Reynoldově čísle, které uvažuje nárys jako čelní plochu, jedná se pouze o odhad a pro přesné hodnoty je nutné užít experimentální měření v aerodynamickém tunelu [17, 43].

$$c_D = 4,808 \cdot 10^{-2} \cdot (\ln Re)^2 - 1,406 \cdot \ln Re + 10,490 \quad (6.6)$$

Rychlost stoupaní se odvíjí od poměru vztlakové síly (6.7a) a síly odporové (6.7b), a je vyjádřena vztahem (6.8), přičemž m udává celkovou hmotnost letové soustavy a V udává objem balónu [17].

$$F_{FL} = (\rho_a V - m) \cdot g \quad (6.7a)$$

$$F_D = \frac{c_D \rho_a \pi r^2 v_z^2}{2} \quad (6.7b)$$

$$v = \sqrt{\frac{8rg}{3c_D} \cdot \left(1 - \frac{3m}{4\pi\rho_a r^3}\right)} \quad (6.8)$$

Objem balónu sférického tvaru je možné stanovit triviálně dle vztahu (6.9), přičemž je nutné znát jeho poloměr. Poloměr balónu se díky konstantnímu množství uloženého plynu a snižujícímu tlaku atmosféry v průběhu stoupaní zvyšuje, což je zjednodušeně vyjádřeno vztahem (6.10), který reflektuje adiabatický index nosného plynu. Pro hélium je adiabatický index definován $\gamma = 1,66$ a pro vodík $\gamma = 1,41$ [9, 17].

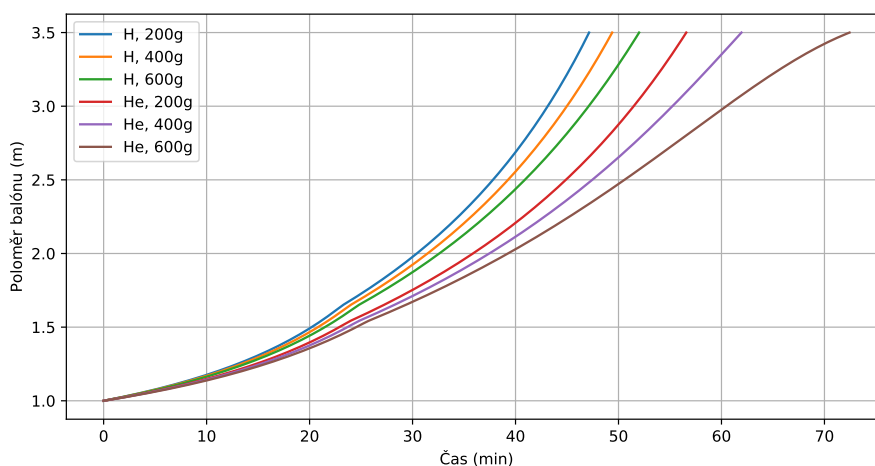
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (6.9)$$

$$r(t+1) = \left(\frac{p_a(t)}{p_a(t+1)}\right)^{\frac{1}{3\gamma}} \cdot r(t) \quad (6.10)$$

Provedením integrace vypočítané rychlosti v jednom kroku simulace získáme přírůstek nadmořské výšky, který se přičte k aktuální výšce, jež je vstupem pro další krok simulace.

6.1.3 Výsledek simulace

Pro získání povědomí o možném chování balónu během stoupání, byla simulace provedena v šesti konfiguracích, které zahrnují kombinace nosného plynu hélia a vodíku s váhami celé letící soustavy v rozsahu 200–600 g. Testovacím subjektem byl zvolen meteorologický balón *KCL 800* s definovaným poloměrem roztrhnutí 700 cm [35]. Simulace byly ukončeny, jak je vidno v grafu 6.1, vždy prasknutím meteorologického balónu. Z grafu je rovněž zřejmé postupné snižování gradientů v průběhu simulace, především pak v konfiguracích s vyšší zátěží či v konfiguracích s héliem.



Obrázek 6.1: Závislost poloměru balónu v čase v různých konfiguracích simulace.

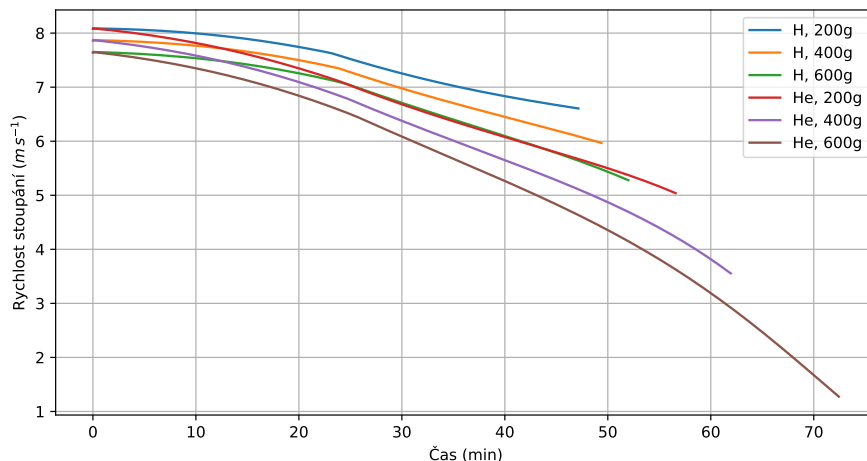
Rychlost stoupání balónu v daném modelu a v daných konfiguracích je při vypuštění okolo 8 m s^{-1} , díky čemuž, jak je vidno v grafu 6.2, stoupání trvá přibližně od 45 do 75 minut. Díky zvolené vzorkovací frekvenci $f = 4 \text{ Hz}$, vzorky odpovídají hladinám o rozestupu 2 m, přičemž s narůstající výškou je možné se dostat na vzorky, jež odpovídají hladinám o rozestupu 1 m.

Přehled rozdílů teplot, atmosférického tlaku a hustoty vzduchu za standardních podmínek při nulové nadmořské výšce, výšce 15 km a 30 km s uvážením maximálního výškového rozdílů 2 m je uveden v tabulce 6.1.

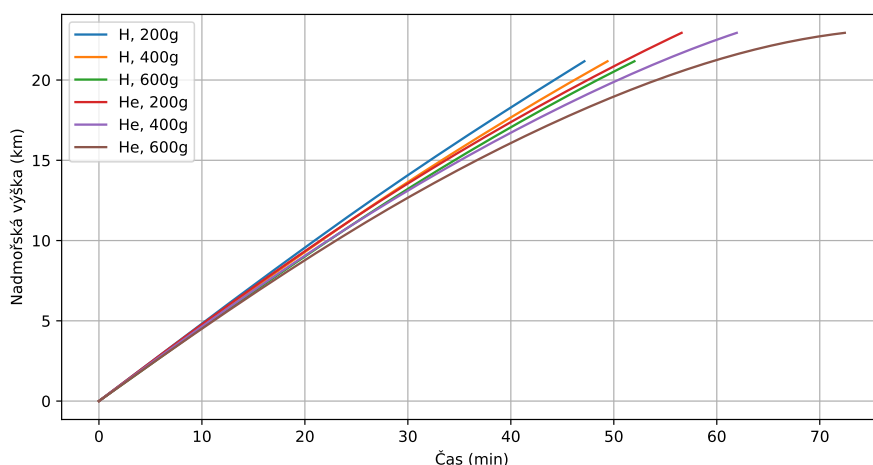
Tabulka 6.1: Přehled diferencí atmosférických veličin při kroku výšky 2 m v různých výškách standardní atmosféry.

Veličina	0 m n. m.	15 km	30 km
Teplota	0,013 °C	0 °C	0 °C
Atmosférický tlak	24,026 Pa	2,508 Pa	1,8 mPa
Hustota vzduchu	235,23 mg m^{-3}	40,328 mg m^{-3}	28,375 ng m^{-3}

Ucelený přehled na časové průběhy stoupání balónu v jednotlivých konfiguracích je zobrazen v grafu 6.3.



Obrázek 6.2: Závislost rychlosti stoupání balónu v čase v různých konfiguracích simulace.



Obrázek 6.3: Závislost nadmořské výšky balónu v čase v různých konfiguracích simulace.

6.2 Kalibrace snímačů a jejich nejistoty

Všechny vybrané snímače jsou dle dostupných informací z technických listů jednotlivých snímačů z výroby kalibrované, avšak pro věrohodnost měření je vhodné provést vlastní kalibraci či ověření jejich správnosti, a to zejména u teploty a tlaku, neboť dané veličiny během mise dosahují extrémních hodnot. Kalibrace snímače pro měření relativní vlhkosti vzduchu by byla rovněž žádoucí, ale jak je možné se dočíst ve zprávě o výsledcích porovnávání vysokokvalitních rádiových sond od WMO [44], při simultánním měření relativní vlhkosti vzduchu se liší výsledky měření napříč různými výrobci až o 30 %RH, z čehož lze usoudit, že v daných podmínkách při současných technologiích nelze jednoznačně určit správnou hodnotu relativní vlhkosti, a tudíž naměřená hodnota je spíše orientační.

Během letu se sonda nikdy nedostane do situace, kdy by mohla provádět sekvenci měření s ustálenými vnějšími vlivy, neboť dle predikce stanovené v sekci 6.1 teplota může klesnout

až o 0,013 °C mezi jednotlivými vzorky, rovněž tak atmosférický tlak o 24,026 Pa. Z tohoto důvodu není možné definovat nejistoty typu A pro letovou konfiguraci. V případě kalibrace snímačů, kdy dochází ke stabilizaci vnějších podmínek, je ji možné definovat na vhodně zvoleném rozsahu vzorků.

Na základě výše uvedeného byly vypočítány a uvedeny v tabulce 6.2 nejistoty typu B pro všechny snímače s uvažováním rovnoměrného rozložení chyb a jejich zdroji, mezi které byly zahrnuty chyby převodu analogově-číslicového převodníku, definované přesnosti snímačů dle technických manuálů, fluktuace úrovně napájení a následek tepelného namáhání při osazování. Do přehledu nebyl zahrnut snímač *ICM-20608-G*, neboť současné řešení jím není osazeno. $u_{B_z1}(x)$ odpovídá deklarované přesnosti, $u_{B_z2}(x)$ chybě převodu ADC, $u_{B_z3}(x)$ ostatním chybám.

Tabulka zároveň udává i rozšířenou nejistotu, která uvažuje koeficient rozšíření $k_e = 2$, pro který při normálním rozložení odpovídá 95% pravděpodobnosti pokrytí výsledku, přičemž vychází z kombinované nejistoty, která je v daném případě shodná s nejistotou typu B.

Tabulka 6.2: Soupis vypočítaných nejistot typu B pro jednotlivé snímače.

Veličina	MS5611-01BA03		HIH8131		MCP342x
	teplota	tlak	teplota	vlhkost	
Přesnost	4 °C	6 mbar	0,8 °C	2 %RH	1,4 mV
Počet bitů	16	16	14	14	16
Minimální hodnota	-40 °C	10 mbar	-40 °C	0 %RH	0 V
Maximální hodnota	85 °C	1 200 mbar	125 °C	100 %RH	2,048 V
Jiné zdroje chyby	0,5 °C	2,5 mbar	0,1 °C	2,5 %RH	16 μV
$\Delta_{z_{max}}$ (4.13)	0,001 °C	9,079 μbar	0,005 °C	0,030 %RH	15,625 μV
$u_{B_z1}(x)$ (4.11)	2,309 °C	3,464 mbar	0,462 °C	1,155 %RH	808,290 μV
$u_{B_z2}(x)$ (4.11)	0,001 °C	5,242 μbar	0,003 °C	0,018 %RH	9,021 μV
$u_{B_z3}(x)$ (4.11)	0,289 °C	1,443 mbar	0,058 °C	1,443 %RH	9,238 μV
$u_B(x)$ (4.12)	2,327 °C	3,753 mbar	0,465 °C	1,849 %RH	808,393 μV
$U_e(x)$ (4.18)	4,655 °C	7,506 mbar	0,931 °C	3,697 %RH	1,616 mV

Pro určení nejistoty typu B při měření úrovně napětí na bateriích a úrovně napájecího napětí je nutné dále určit nejistoty, které odrážejí výrobní tolerance rezistorů (4.14). V obou případech je užito symetrický dělič napětí, který je složen ze dvou rezistorů o nominální hodnotě $R = 4,7 \text{ k}\Omega$ s tolerancí 1%, přičemž nejistota každého z nich odpovídá 47Ω . Rezistor pro měření úbytku napětí na *PT1000-550* má nominální hodnotu $R = 11 \text{ k}\Omega$ s tolerancí 0,1%, přičemž jeho nejistota odpovídá $1,1 \Omega$.

Jelikož rezistivita *PT1000-550* je dopočítávána dle vztahu (5.2), nikoli přímo měřena, je nutné určit i nejistotu nepřímého měření, tj. citlivostní koeficienty, které odpovídají

parciálním derivacím dle jednotlivých proměnných a jsou určeny vztahy (6.11a), (6.11b) a (6.11c).

$$A_{U_{V_{cc}}} = \frac{\partial U}{\partial U_{V_{cc}}} = \frac{R_{PT1000}}{R_{PT1000} + R} \quad (6.11a)$$

$$A_{R_{PT1000}} = \frac{\partial U}{\partial R_{PT1000}} = U_{V_{cc}} \cdot \frac{R}{(R_{PT1000} + R)^2} \quad (6.11b)$$

$$A_R = \frac{\partial U}{\partial R} = -U_{V_{cc}} \cdot \frac{R_{PT1000}}{(R_{PT1000} + R)^2} \quad (6.11c)$$

Výsledná kombinovaná nejistota pro určení úbytku napětí na *PT1000-550* je dána rovnicí (6.12), přičemž rozšíříme-li ji koeficientem rozšíření $k_e = 2$, při normálním rozložení odpovídá 95% pravděpodobnosti pokrytí výsledků měření.

$$u_c(U) = \sqrt{(A_{U_{V_{cc}}} u_B(U_{V_{cc}}))^2 + \left(A_{R_{PT1000}} \frac{0,30 + 0,005|t|}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(A_R \frac{1,1}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (6.12)$$

6.2.1 Kalibrační měření MS5611-01BA03

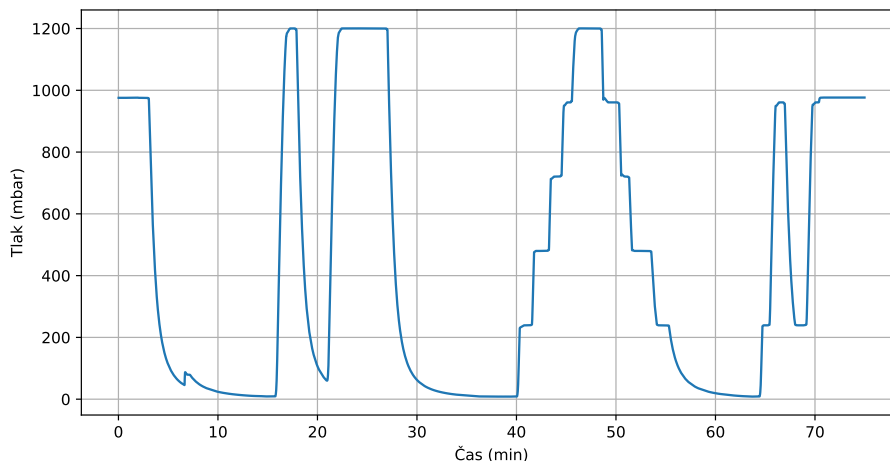
Kalibrace tlakového snímače byla provedena v akreditované laboratoři společnosti *BD Sensors*, jehož výsledek je uveden v tabulce 6.3. Kalibrační list se všemi detaily kalibrace je uveden v příloze G. Jelikož naměřené chyby jsou v definované přesnosti snímače, není nutné programově upravovat výsledky měření dle kalibračního měření.

Tabulka 6.3: Výsledky kalibrace snímače *MS5611-01BA03*.

p_{REF} (mbar)	Vzestupná změna		Sestupná změna	
	p_{DUT} (mbar)	chyba (mbar)	p_{DUT} (mbar)	chyba (mbar)
10,00	8,34	-1,66	8,38	-1,62
240,00	239,11	-0,89	293,20	-0,80
480,00	479,93	-0,07	479,98	-0,02
720,00	720,59	0,59	720,63	0,63
960,00	960,83	0,83	960,85	0,85
1200,00	1200,39	0,39	1200,40	0,40

Kalibrace spočívala v umístění DPS sondy do tlakové nádoby plněné dusíkem, jejíž tlak byl regulován pomocí *PPC3-200K A160Kp/BG15Kp* v plném rozsahu měření 10–1200 mbar. Před samotným procesem byl snímač „rozcvičen“ dvakrát snížením tlaku na minimální mez a následně na maximální mez. Ke kalibraci bylo rovnoměrně zvoleno 6 tlakových bodů, na kterých bylo po ustálení tlaku prováděno porovnání měřených hodnot vůči přesnému referenčnímu tlaku, a to při vzestupném i sestupném směru. Průběh vývoje tlaku během kalibrace je uveden na obrázku 6.4.

Kalibraci bylo možné provést jen při pokojové teplotě, neboť umístění a provedení tlakoměrného snímače jej neumožňovalo umístit to tepelné komory s regulací tlaku.



Obrázek 6.4: Průběh vývoje naměřeného tlaku během kalibrace.

6.2.2 Ověření výsledků měření PT1000

Věrohodnost výsledků měření teploty pomocí *PT1000* a celé měřící posloupnosti byla ověřena v teplotní komoře *CTS T -40/100* s volbou teploty v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž měřená hodnota byla porovnávána vůči kalibrovanému snímači *PT1000 Beames RPR-420-300*, jehož rezistivita byla odečítána na digitálním multimetru *Keithley 2010*. Výpočet referenční teploty byl vyjadřován pomocí kalibračního standardu ITS-90 kalibrační laboratoří. Odečítání hodnot bylo provedeno až po 45 minutách po stabilizaci nastavené teploty v tepelné komoře. Výsledek měření je uveden v tabulce 6.4.

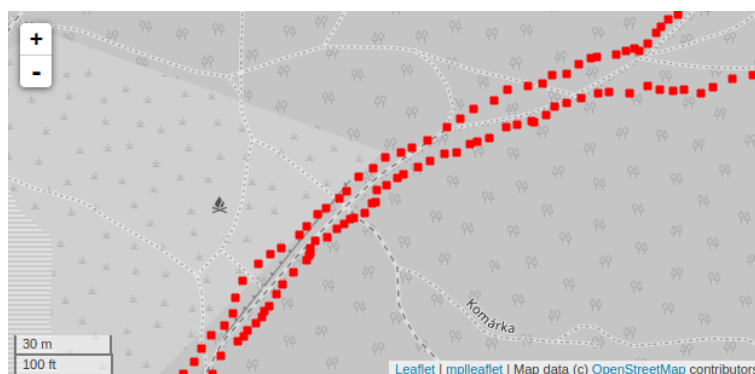
Tabulka 6.4: Výsledky ověření věrohodnosti měření *PT1000-550*.

Nastavená t. ($^{\circ}\text{C}$)	Referenční t. ($^{\circ}\text{C}$)	Naměřená t. ($^{\circ}\text{C}$)	Rozdíl ($^{\circ}\text{C}$)
-40	-40,52	-40,32	-0,20
-20	-19,93	-19,47	-0,46
0	0,00	0,23	-0,23
20	20,37	20,69	-0,32
40	40,64	39,96	0,68

6.3 Ověření měření polohy

Poloha je odečítána GNSS přijímačem *MAX-M8Q-0* dále s údaji o výšce, rychlosti pohybu a jeho kurzu. Jelikož byl nastaven model měření pro určení ve vzduchu, při kterém je uvedena velká poziční odchylka, je žádoucí tuto odchylku kvantifikovat. Jelikož ostré měření bude probíhat ve volném prostoru, pro testování byly vybrány lesní a polní cesty, aby bylo omezeno přijímání odražených signálů od domovní zástavby, aby bylo možné porovnat naměřená data vůči referenčním bodům na mapě.

Jak lze vidět na obrázku 6.5, na níž je vyznačená testovací trajektorie podvzorkována na 0,2 Hz, odchylka naměřené polohy vůči referenční trajektorii je v jednotkách metrů.



Obrázek 6.5: Vyznačení naměřené podvzorkované trajektorie v mapě.

6.4 Letový experiment

S laskavou spoluprací s ČHMÚ byly provedeny dva letové experimenty ve dnech 19. 5. a 25. 5. 2021 z meteorologické stanice Praha-Libuš, kdy byla experimentální sonda zavěšena na 4,7m dlouhém provazu pod „ostrou“ aerologickou sondou *Vaisala RS41-SG*. Ta byla zavěšena na 50m provazu pod meteorologickým balónem plněným vodíkem a byl vypuštěn v čase 06 UTC ze zmíněné meteorologické stanice. Druhý let se lišil oproti prvnímu absencí letové soustavy o zpomalovací padák a opatřením DPS o voskovou ochranu součástí.

V dané konfiguraci se jedná o zjednodušené komparativní měření aerologických sond, neboť jsou zavěšeny pod sebou, a tudíž v jednom okamžiku jsou měřeny různé hladiny atmosféry. Pro co nejpřesnější porovnání by bylo nutné například je zavěsit na konce vodorovné dřevěné tyče o délce až 3 m, jak doporučuje *Vaisala* v instrukčním manuálu [82]. Pro srovnání byly použity vyhodnocené naměřené údaje z *RS41-SG* pomocí systému *MW32* od společnosti *Vaisala*.

V obou případech nebyla sonda osazena rádiovým modulem *Radiometrix MTX* a příslušnou anténou, jelikož bylo nutné kvůli tandemovému vzestupu dodržet maximální hmotnost zátěže.

6.4.1 První letový experiment

První letový experiment dosáhl omezené úspěšnosti, neboť sonda přestala po přibližně 20 minutách letu, pravděpodobně kvůli velké vlhkosti v oblasti vzduchového tunelu, zaznamenávat měřené veličiny. Z důvodu krátkého záznamu, který obsahuje zaznamenaná data do výšky 6,5 km a lokální naměřené teplotě $-29,64^{\circ}\text{C}$, nejsou získané výsledky měření předmětem podrobného popisu.

Maximální výška letu naměřená *RS41-SG* byla 34 396,42 km, kterou sestava dosáhla od vypuštění po 108,2 minutách.

Celková doba letu, včetně nekontrolovaného sestupu na padáku, činila 173,2 minuty, přičemž místo dopadu se souřadnicemi $50^{\circ}11'2,442''\text{N } 14^{\circ}50'18,238''\text{E}$ je od místa vypuštění vzdálené vzdušnou čarou 34,08 km.

6.4.2 Druhý letový experiment

Na základě zkušeností z prvního letového experimentu byla pro druhý letový experiment kritická část DPS opatřena voskovou ochranou. Experiment byl zahájen při atmosférickém tlaku 979,00 hPa, teplotě vzduchu 9,30 °C, relativní vlhkosti vzduchu 82,0 %RH, směru větru 205 ° při rychlosti 3,4 m s⁻¹ dle pozemních snímačů meteorologické stanice.

Soustava po 102,55 minutách letu dosáhla výšky 34,742 km, kdy praskl balón a byla zahájena sestupná fáze letu maximální rychlostí klesání 65,0 m s⁻¹. Sestup trval 25,32 minut, přičemž soustava dopadla k okraji lesa se souřadnicemi 50°47'48,257"N 15°16'1,661"E. Ten je vzdušnou čarou vzdálen od místa vypuštění 105,2 km.

6.4.3 Vyhodnocení druhého letového experimentu

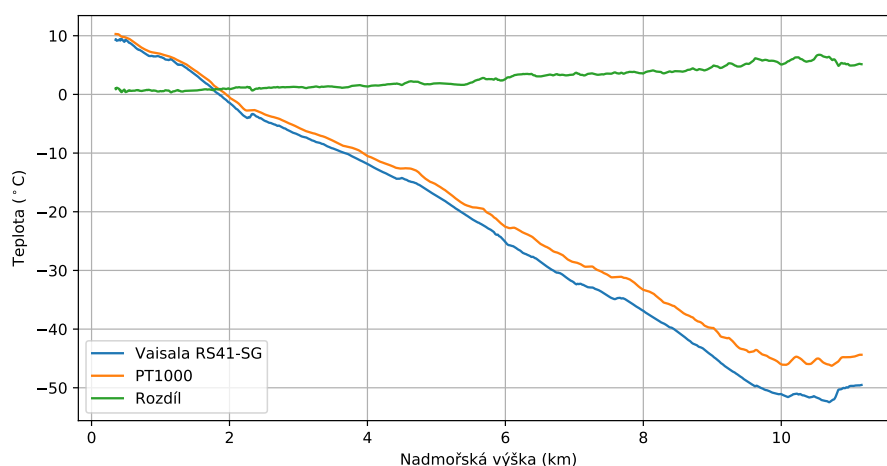
Vzhledem ke skutečnosti, že sonda je primárně určena pro aerologické měření v troposféře, jsou následující analýzy zaměřeny právě na tuto oblast v režimu stoupavého měření, přičemž jsou vztaženy k nadmořské výšce.

Naměřená data byla podvzorkována výběrem prvního vzorku v sekundě dle GNSS času na jednotnou frekvenci 1 Hz. Porovnání měřených veličin udávají rozdíly měřených hodnot naší sondy vůči referenčním hodnotám aerologické sondy *RS41-SG*.

Analýza měření teploty vzduchu

Teplotu vzduchu měřila sonda pomocí snímače *PT1000-550*, který byl vyveden přibližně 1 cm mimo DPS sondy. Vzduch proudil kolem snímače tunelem o průměru 8 mm.

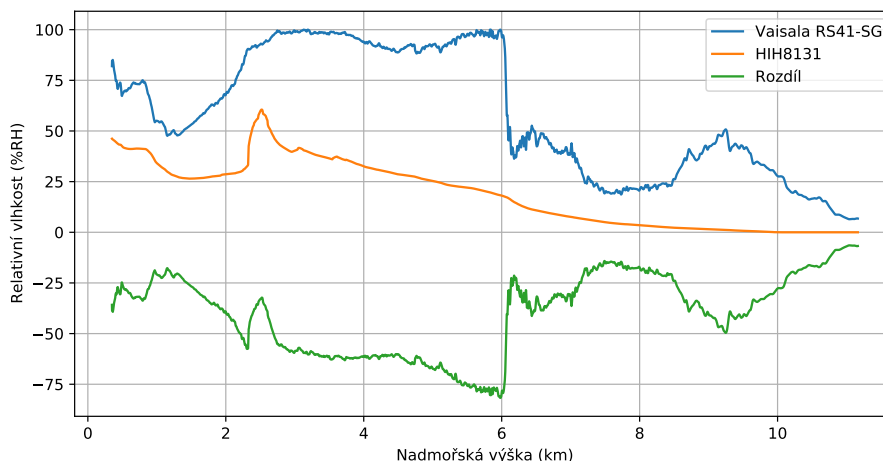
Jak je vidno v grafu 6.6, rozdíl naměřené teploty *RS41-SG* a *PT1000-550* je v době vypuštění přibližně 1 °C, přičemž dosáhl během stoupaní až 6,76 °C. Je zřejmé, že teplotní snímač byl ovlivňován vyzařovaným teplem sondy a její tepelnou kapacitou při nedostatečném proudění okolního vzduchu. Proto je pro další vývoj sondy nutné daný vzduchový tunel adekvátně opravit.



Obrázek 6.6: Výsledky měření teploty vzduchu během druhého letového experimentu.

Analýza měření relativní vlhkosti vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu byla měřena pomocí snímače *HIH8131*. Výsledek měření potvrdil předpoklad, že dané měření je značně problematické, neboť, jak znázorňuje graf 6.7, naměřené hodnoty se liší až o 82 %RH.



Obrázek 6.7: Výsledky měření relativní vlhkosti vzduchu během druhého letového experimentu.

Ačkoli byl snímač *HIH8131* před letem ponechán 24 hodin při pokojové teplotě při relativní vlhkosti ≥ 50 %RH, aby byl dostatečně hydratován, během prvních desítek minut letu vykazoval nedostatečně přesné výsledky měření. Ve výšce 10 km již udával nulovou relativní vlhkost vzduchu, přičemž relativní vlhkost měřená *RS41-SG* udávala podobnou hodnotu (1, 2 %RH) až ve výšce 14 km.

Analýza měření atmosférického tlaku

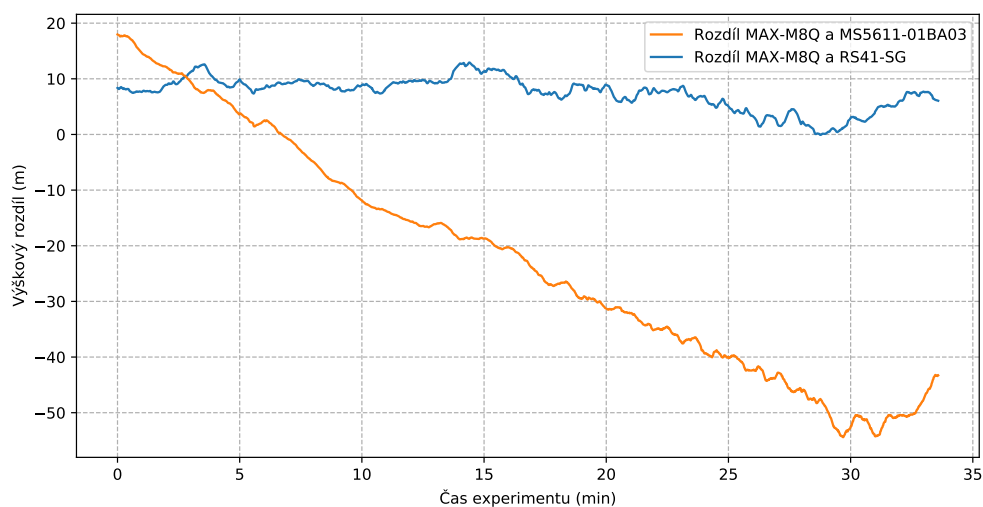
Porovnání výsledků měření atmosférického tlaku se sondou *RS41-SG* není proveditelné, protože daná sonda atmosférický tlak nesnímá. Na druhou stranu je jej možné dle rovnice (6.13) publikované¹ *Národním úřadem pro oceán a atmosféru* (NOAA) přepočítat na nadmořskou výšku, která je měřena oběma sondami. Její výsledek je ve stopách, tudíž je nutné jej vynásobit hodnotou 0,3048 pro převod do metrické soustavy [9].

$$h = 145\,366,45 \left[1 - \left(\frac{p}{1013,25} \right)^{0,190\,284} \right] \quad (6.13)$$

Nadmořská výška měřená *MAX-M8Q* se lišila oproti *RS41-SG* během stoupání v troposféře v rozsahu 0 m až 13 m, ačkoli vzdálenost mezi sondami činila 4,7 m. Daných výsledků bylo dosaženo až po odečtení zvlnění geoidu v oblasti startu (45 m) od hodnot *RS41-SG*, neboť *RS41-SG* měřila od referenčního elipsoidu, přičemž *MAX-M8Q* udává výsledky v nadmořské výšce.

¹<https://www.weather.gov/media/epz/wxcalc/pressureAltitude.pdf>

Atmosférický tlak měřený snímačem *MS5611-01BA03* je porovnáván s výškou měřenou pomocí GNSS přijímače *MAX-M8Q*, který se v průběhu měření nacházel ve stejné letové hladině. Vývoj rozdílů měření nadmořské výšky je uveden v grafu 6.8.

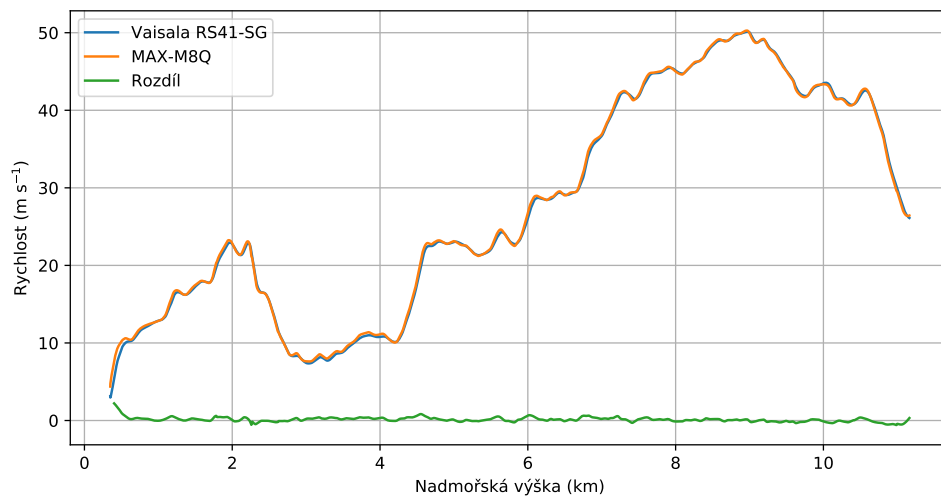


Obrázek 6.8: Výsledky měření nadmořské výšky během druhého letového experimentu.

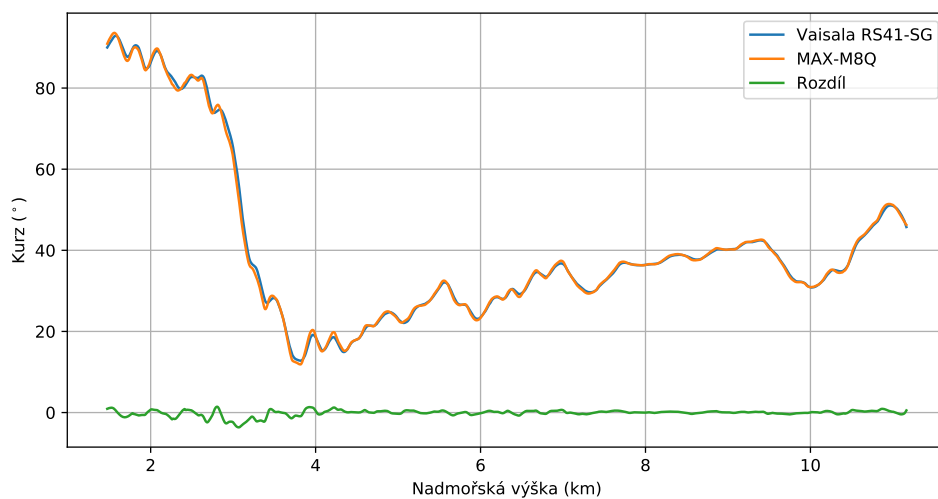
Analýza rychlosti a směru větru

Pro obě sondy obstarávají poziční data GNSS přijímače od společnosti *U-Blox*, proto lze předpokládat, že výsledky měření pozice, rychlosti a kurzu budou podobné. Surová naměřená data však nelze přímo použít k porovnání, neboť je v nich zanesen šum v podobě houpání jednotlivých sond a pro určení kýžených veličin je nutné tento šum odfiltrovat. Zvolíme-li předpoklad, že kmity sondy nepřesáhnou frekvenci 0,04 Hz, dostaneme relevantní signály.

Dle předpokladu jsou výsledky měření podobné. V následujících grafech jsou zaneseny pouze hodnoty naměřené navrhovanou aerologickou sondou a rozdíl těchto hodnot vůči hodnotám z *RS41-SG*. Rychlost pohybu sond (větru) je zobrazena v grafu 6.9, jejich kurz je pak v grafu 6.10.



Obrázek 6.9: Výsledky měření rychlostí sond během druhého letového experimentu.



Obrázek 6.10: Výsledky měření kurzu sond během druhého letového experimentu.

Kapitola 7

Budoucí vývoj v oblasti aerologických měření

Provádění aerologických měření podává aktuální informace o stavu zemské atmosféry, stav které je směrodatný pro různá odvětví průmyslu. Proto lze říci, že aerologická měření budou i nadále potřebná a má smysl pokračovat ve vývoji a zdokonalování aerologické sondy. Vývoj sondy směřoval od počátku k dosažení co nejmenší hmotnosti při co nejpřesnějším měření základních atmosférických veličin v troposféře zohledňujíc cenu výsledného řešení.

Z pohledu již snímaných veličin by měl být budoucí vývoj zaměřen na zpřesnění výsledků měření relativní vlhkosti a teploty vzduchu. Teplota vzduchu byla do jisté míry ovlivněna nedostatečným prouděním vzduchu kolem snímače. Před zvažováním alternativního výběru senzoru je žádoucí experimentovat v oblasti umístění daného snímače mimo tělo sondy tak, aby nedocházelo k výraznému ovlivnění slunečním zářením.

Navržená platforma je při extrémních podmínkách schopna setrvat v provozu až 20 hodin. V dalších fázích vývoje je proto možné platformu osadit dalšími snímači, pro která jsou již nyní vyvedená rozhraní UART a I²C. Návrh desky plošného spoje uvažoval i s využitím IMU jednotky *ICM-20608-G*, která nebyla doposud osazena. Budoucí experimenty by již danou IMU jednotku mohly využít pro získání kvalifikovanějšího povědomí o chování platformy během stoupaní, prasknutí nosného balónu, pádu a dopadu.

Současné řešení určování teploty pomocí snímače *PT1000-550* využívá převodní tabulku rezistivity snímače na teplotu, která definuje maximální rozsah měřených teplot, přičemž velikost tabulky je omezena velikostí flash paměti použitého mikrokontroléru. V budoucím vývoji by měla být zaměřena pozornost i na odstranění omezení měřicího rozsahu teploty tabulkou tak, aby byl rozsah měřených teplot pouze funkcí provedení snímače.

Kapitola 8

Závěr

Tato práce se zabývá návrhem a realizací platformy pro provádění aerologických měření v troposféře.

V rámci návrhu byla diskutována problematika měření atmosférických veličin. Na základě požadavků na vestavěný systém byl vytvořen jeho koncept tak, aby byl systém schopen provádět základní aerologická měření. S ohledem na technické parametry a dostupnost komponent byl rozebrán návrh desky plošného spoje, který mimo jiné zahrnuje mikrokontrolér *STM32L151CBT6A*, teplotní snímač *PT1000-550*, snímač absolutního tlaku *MS5611-01BA03*, snímač relativní vlhkosti vzduchu *HIH8131*, GNSS přijímač *MAX-M8Q*, rádiový vysílací modul *MTX2-434.650-10*, IMU jednotku *ICM-20608-G* a slot pro microSD kartu. Deska plošného spoje platformy se vyznačuje rozměry 43×59 mm. Celkové rozměry sondy jsou $8 \times 13 \times 5$ cm při hmotnosti 69 g bez vysílací rádiové antény a minimální výdrž 20 h.

Výsledné řešení bylo testováno v laboratorních podmínkách při tlaku 10 mbar a při teplotě -40 °C. Testování také zahrnovalo provedení letového experimentu ve spolupráci s ČHMÚ, kdy byla platforma zavěšena pod ostrou aerologickou sondou a vynesena až do stratosféry.

Sonda průběžně snímá teplotu a relativní vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, rychlost a směr větru, přičemž naměřené hodnoty ukládá ve formátu CSV na microSD kartu.

Literatura

- [1] *Coordinating Committee for Multilateral Export Controls*. [Online; navštíveno 02.03.2020]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinating_Committee_for_Multilateral_Export_Controls.
- [2] Antény (nejen) pro amatérská pásma. *Konstrukční elektronika a Radio*. AMARO spol. březen 2002. ISSN 1211-3557.
- [3] Snímače tlaku. *Automa*. Automa-časopis pro automatizační techniku. Leden 2011. ISSN 1210-9592.
- [4] 100:2008, J. *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Září 2008. První vydání.
- [5] AIR NAVIGATION SERVICES OF THE CZECH REPUBLIC. *ENR 5.3 Jiné činnosti nebezpečné povahy a jiná možná nebezpečí*. [Online; navštíveno 02.03.2020]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/e5-3.pdf.
- [6] ANUSHA. *Humidity Sensor – Types and Working Principle*. [Online; navštíveno 15.01.2020]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/humidity-sensor-types-working-principle/>.
- [7] BEDNÁŘ, J. *Meteorologie: Úvod do studia dějů v zemské atmosféře*. Praha: Portál, 2003. ISBN 80-7178-653-5.
- [8] BETKE, K. *The NMEA 0183 Protocol*. Květen 2000. Rev. 2001.
- [9] BROŽ, J., ROSKOVEC, V. a VALOUCH, M. *Fyzikální a matematické tabulky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980. ISBN 04-007-80.
- [10] CARLSON, A. B. a CRILLY, P. B. *Communication Systems - An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*. 5. vyd. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-0-07-338040-7.
- [11] CARR, J. J. *Practical Antenna Handbook*. 4. vyd. New York: McGraw-Hill, 2001. ISBN 0-07-137435-3.
- [12] CATSOULIS, J. *Designing embedded hardware*. 2. vyd. Sebastopol: O'Reilly, 2005. ISBN 0-596-00755-8.
- [13] CAVCAR, M. *The International Standard Atmosphere (ISA)*. Anadolu University.
- [14] DVOŘÁK, P. *Atlas počasí*. Cheb: Svět křídel, 2003. ISBN 80-86808-02-5.

- [15] ENERGIZER BRANDS. *Cylindrical Primary Lithium - Handbook and Application Manual*. [Online; navštíveno 05.03.2020]. Dostupné z: https://data.energizer.com/PDFs/lithium191192_appman.pdf.
- [16] ENERGIZER BRANDS. *Energizer L91 Ultimate Lithium - Product Datasheet*. [Online; navštíveno 05.03.2020]. Dostupné z: <https://data.energizer.com/PDFs/191.pdf>.
- [17] GALLICE, A., WIENHOLD, F. G., HOYLE, C. R., IMMLER, F. a PETER, T. *Modeling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion*. říjen 2011.
- [18] GRAW RADIOSONDES. *GRAW - Model DFM-09 - Radiosonde Systems*. [Online; navštíveno 15.01.2020]. Dostupné z: <https://www.environmental-expert.com/products/graw-model-dfm-09-radiosonde-systems-265729>.
- [19] HABDUINO. *HABduino Telemetry shield for Arduino*. [Online; navštíveno 16.01.2020]. Dostupné z: <https://github.com/HABduino/HABduino/blob/master/Documentation/HABDUINO-Instructions.pdf>.
- [20] HABHUB. *HAB tracker*. [Online; navštíveno 12.04.2020]. Dostupné z: <https://tracker.habhub.org>.
- [21] HIROSE ELECTRIC. *DM3BT-DFS-PEJS*. [Online; navštíveno 05.03.2020]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/fb2dc6b377bb9f950817aba832ced8fb/DM3BT-DSF-PEJS.pdf>.
- [22] HONEYWELL. *I²C Communication with the Honeywell HumidIconTM Digital Humidity/Temperature Sensors*. červen 2012.
- [23] HONEYWELL. *Honeywell HumidIconTM Digital Humidity/Temperature Sensors - HIH6000 Series*. Květen 2015.
- [24] HONEYWELL. *Honeywell HumidIconTM Digital Humidity/Temperature Sensors - HIH7000 Series*. Květen 2015.
- [25] HONEYWELL. *Honeywell HumidIconTM Digital Humidity/Temperature Sensors - HIH8000 Series*. Květen 2015.
- [26] HONEYWELL. *Honeywell HumidIconTM Digital Humidity/Temperature Sensors - HIH9000 Series*. Květen 2015.
- [27] HONEYWELL. *MPR SERIES - MicroPressure Board Mount Pressure Sensors Compact, High Accuracy, Compensated/Amplified*. Září 2019.
- [28] HOWARH, P. a REDGRAVE, F. *Metrology - in short*. 3. vyd. Braunschweig, Germany: EURAMET e.V., 2008. ISBN 978-87-988154-5-7.
- [29] HUGHES, J. M. *Practical electronics : components and techniques*. Sebastopol: O'Reilly, 2015. ISBN 9781449373078.
- [30] INSTITUT Český metrologický. *Vše o ČMI*. [Online; navštíveno 02.02.2020]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/vse_o_cmi.
- [31] INTERMET SYSTEMS. *iMet-4 Radiosonde 403 MHz GPS Synoptic Technical Data Sheet*. [Online; navštíveno 15.01.2020]. Dostupné z: https://www.intermetsystems.com/ee/pdf/202084-10_iMet-4_Technical_Data_Sheet.pdf.

- [32] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *World Geodetic System - 1984 (WGS-84) Manual*. [Online; navštíveno 22.01.2020]. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ECARAIM/REF08-Doc9674.pdf>.
- [33] INVENSENSE. *ICM-20608-G Datasheet*. červen 2015. Rev. 1,0.
- [34] INVENSENSE. *ICM-20608-G Register Maps and Description*. červen 2015. Rev. 1,0.
- [35] KAYMONT. *Meteorological ceiling & pibal balloons*. [Online; navštíveno 21.03.2020]. Dostupné z: <https://www.kaymont.com/meteorological>.
- [36] KINGSTON. *Industrial Temperature microSD UHS-I*. 2020.
- [37] KOPÁČEK, J., BEDNÁŘ, J. a ŽÁK, M. *Jak vzniká počasí*. Praha: Karolinum, 2019. ISBN 978-80-4423-3.
- [38] LNĚNIČKA, J. *Jak se vznášet ve vzduchu*. [Online; navštíveno 12.01.2020]. Dostupné z: https://www.airspace.cz/akademie_letectvi/2011/12/jak-se-vznaset-ve-vzduchu/.
- [39] METEOLABOR. *SRS-C34 Digital Radiosonde*. [Online; navštíveno 16.01.2020]. Dostupné z: <http://www.meteolabor.ch/meteo-messgeraete/radiosondierung/>.
- [40] MICROCHIP TECHNOLOGY. *MCP3422/3/4*. [Online; navštíveno 03.03.2020]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/9cf91ec5ff8af5ed75d1297ae79a4719/mcp3422_3_4.pdf.
- [41] NANCY HALL. *Air Viscosity*. [Online; navštíveno 15.03.2020]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/viscosity.html>.
- [42] NANCY HALL. *Reynolds number*. [Online; navštíveno 15.03.2020]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/reynolds.html>.
- [43] NANCY HALL. *The Drag Coefficient*. [Online; navštíveno 15.03.2020]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/dragco.html>.
- [44] NASH, J., OAKLEY, T., VÖMEL, H. a WEI, L. *WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems*. Report No. 107. Yangjiang, China: World Meteorological Organization, 2011.
- [45] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. FEKT VUT Brno, 2006.
- [46] PI IN THE SKY PROJECT. *Pi In The Sky - Raspberry Pi Telemetry Board*. [Online; navštíveno 16.01.2020]. Dostupné z: <http://www.pi-in-the-sky.com>.
- [47] PROFUSE. *PLATINUM TEMPERATURE SENSOR PT1000-550*. [Online; navštíveno 02.03.2020]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/67cf717905f835bc5efcdcd56ca3a8e2/Pt1000-550_EN.pdf.
- [48] PROŠEK, P. a REIN, F. *Mikroklima a mezní vrstva atmosféry*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1982. ISBN 17-103-81.
- [49] RADIOMETRIX. *MTX2 - UHF Narrow Band FM sub-miniature transmitter*. [Online; navštíveno 25.01.2020]. Dostupné z: <http://www.radiometrix.com/files/additional/mtx2.pdf>.

- [50] RADIOMETRIX. *NRX2B-UHF narrow band single channel FM receiver frequencies 434.075MHz , 434.650MHz, 458.700MHz*. [Online; navštíveno 18.03.2020]. Dostupné z: <https://radiometrix.mybigcommerce.com/nrx2b-uhf-narrow-band-single-channel-fm-receiver-frequencies-434-075mhz-434-650mhz-458-700mhz/>.
- [51] RAPANT, P. *Družicové polohové systémy*. 1. vyd. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0124-8.
- [52] RTL-SDR. *RTL-SDR Blog V3 Datasheet*. [Online; navštíveno 19.03.2020]. Dostupné z: <https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2018/02/RTL-SDR-Blog-V3-Datasheet.pdf>.
- [53] RTL-SDR. *RTL-SDR BLOG V3 R820T2 RTL2832U 1PPM TCXO SMA Software Defined Radio (dongle only)*. [Online; navštíveno 18.03.2020]. Dostupné z: <https://www.rtl-sdr.com/product/rtl-sdr-blog-v3-r820t2-rtl2832u-1ppm-tcxo-sma-software-defined-radio-dongle-only/>.
- [54] RUBKOVÁ Šárka. *Tajemství podnebí*. Praha: Velryba s.r.o., 1997. ISBN 80-901322-8-6.
- [55] SAMSUNG. *Samsung microSD UHS-I Card: PRO Endurance Lineup*. 2018. Rev. 1.0.
- [56] SANDISK. *SanDisk SD Card - Product Manual*. [Online; navštíveno 05.03.2020]. Dostupné z: <https://www.brokentoaster.com/arduinoamp3/files/Sandiskmanual-SecureDigital2.2.pdf>.
- [57] SANDISK. *SanDisk® Industrial microSD™ Card*. Prosinec 2015. Rev. 1.0.
- [58] SCHOLLES, D. B. *"Evaluation of the Aerodynamic Differences of a Balloon Shape and a Sphere Using Computational Fluid Dynamic Modeling in Fluent*. Utah State University. 2011.
- [59] SMOLKA, V. *Všeobecná cirkulace atmosféry*. [Online; navštíveno 05.01.2020]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vseobecna-cirkulace-atmosfery/>.
- [60] SR PASSIVES. *GPS Internal Active Antenna - Model GPS-ANT048*.
- [61] STMICROELECTRONIC. *STM32CubeMX - Data brief*. únor 2019. Rev. 12.
- [62] STMICROELECTRONIC. *STM32CubeProg - Data brief*. únor 2019. Rev. 4.
- [63] STMICROELECTRONIC. *Description of STM32F1 HAL and low-layer drivers*. únor 2020. Rev. 3.
- [64] STMICROELECTRONICS. *STM32L151x6/8/B-A, STM32L152x6/8/B-A*. [Online; navštíveno 05.03.2020]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/00fbf4e9becc56d72808da85e4d4b198/stm32l151cb-a.pdf>.
- [65] TE CONNECTIVITY. *MS5637-02BA03 Low Voltage Barometric Pressure sensor*. Zářít 2015.
- [66] TE CONNECTIVITY. *MS5611-01BA03 Barometric Pressure Sensor, with stainless steel cap*. červen 2017.
- [67] TE CONNECTIVITY. *MS5803-02BA Miniature Altimeter Module*. Srpen 2017.

- [68] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS6300x High-Efficient Single Inductor Buck-Boost Converter With 1.8-A Switches*. Březen 2006. Rev. Říjen 2015.
- [69] TEXAS INSTRUMENTS. *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor*. Listopad 2015. Rev. Leden 2016.
- [70] TEXAS INSTRUMENTS. *HDC2021 High-Accuracy, Low-Power Humidity and Temperature Sensor With Assembly Protection Cover*. Prosinec 2019. Rev. Červen 2020.
- [71] U-BLOX. *U-Blox GNSS product overview*. [Online; navštíveno 26.01.2020]. Dostupné z: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GNSS-product_Overview_\(UBX-14000426\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GNSS-product_Overview_(UBX-14000426).pdf).
- [72] U-BLOX. *MAX-M8 series*. Květen 2019. Rev. 5.
- [73] U-BLOX. *u-blox 8 / u-blox M8 Receiver description Including protocol specification*. únor 2021. Rev. 23.
- [74] UK HIGH ALTITUDE SOCIETY. *Beginners Guide to Tracking using dl-fldigi*. [Online; navštíveno 06.03.2020]. Dostupné z: https://ukhas.org.uk/guides:tracking_guide.
- [75] UK HIGH ALTITUDE SOCIETY. *Communications Protocol*. [Online; navštíveno 29.01.2020]. Dostupné z: <https://ukhas.org.uk/communication:protocol>.
- [76] UK HIGH ALTITUDE SOCIETY. *GPS Modules*. [Online; navštíveno 29.01.2020]. Dostupné z: https://ukhas.org.uk/guides:gps_modules.
- [77] UK HIGH ALTITUDE SOCIETY. *Radios*. [Online; navštíveno 25.01.2020]. Dostupné z: https://ukhas.org.uk/guides:radio_modules.
- [78] VAISALA. *Dropsonde RD41*. [Online; navštíveno 12.01.2020]. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/soundings-products/rd41>.
- [79] VAISALA. *Radiosonde RS41*. [Online; navštíveno 12.01.2020]. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/soundings-products/rs41>.
- [80] VAISALA. *User Guide - Vaisala Radiosonde - RS41-SG and RS41-SGP*. [Online; navštíveno 04.03.2020]. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Vaisala%20Radiosonde%20RS41-SG%20and%20RS41-SGP%20User%20Guide%20M211667EN-G.pdf>.
- [81] VAISALA. *User's Guide - Vaisala Radiosonde - RS92-D*. [Online; navštíveno 04.03.2020]. Dostupné z: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/RS92-D_Users_guide_in_English_M210987EN-C.pdf.
- [82] VAISALA. *Instructions to Prepare a Rigging for Comparison Sounding*. Březen 2014. PR210147EN-A.
- [83] VAISALA. *HMM105 Digital Humidity Module*. 2017.
- [84] VAISALA. *HMM100 Humidity Module*. 2019.

- [85] VYSOUDIL, M. *Meteorologie a klimatologie pro geografu*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 1997. ISBN 80-7067-773-2.
- [86] VYSOUDIL, M. *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 2013. ISBN 978-80-244-3892-4.
- [87] WIKA ALEXANDER WIEGAND. *Operating limits and tolerances of platinum resistance thermometers per DIN EN IEC 60751*. [Online; navštíveno 02.03.2020]. Dostupné z: https://www.wika.ca/upload/DS_IN0017_en_co_20804.pdf.
- [88] ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ. *Letecký předpis Pravidla létání L2*. [Online; navštíveno 08.01.2020]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf.
- [89] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Nalezli jste radiosondu?* [Online; navštíveno 20.01.2020]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-a-zajimovosti/nalezli-jste-radiosondu>.
- [90] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/12.2019-9 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. [Online; navštíveno 05.03.2020]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/12.2019-9/obrazky/vo-r10-122019-9.pdf>.

Příloha A

Porovnání profesionálních rádiových sond

Tabulka A.1: Souhrn význačných parametrů vybraných profesionálních rádiových sond.

Parametr	RS41-SGP	iMet-4	DFM-09	SRS-C34
Vzorkovací frekvence (Hz)	1	1		
Délka (mm)	155 (282)	139 (235)	200	350
Šířka (mm)	63 (63)	67 (67)	42	210
Výška (mm)	46 (104)	31 (31)	60	100
Váha (g)	84	120	90	620
Minimální tlak (hPa)	3	3		5
Maximální tlak (hPa)	1 013	1 013		1 100
Nejistota tlaku (hPa)	0,4	2	0,3	2,2
Rozlišení tlaku (hPa)	0,01	0,1	0,1	0,1
Minimální teplota (°C)	-95	-90		-100
Maximální teplota (°C)	+60	+60		+60
Nejistota teploty (°C)	0,4	1	0,2	0,1
Rozlišení teploty (°C)	0,01	0,01	0,1	0,01
Nejistota vlhkosti (%RH)	4	5	5	1
Rozlišení vlhkosti (%RH)	0,1	0,1	1	0,1
Nejistota rychlosti (m s ⁻¹)	0,15	0,5	0,2	0,12
Rozlišení rychlosti (m s ⁻¹)	0,1	0,1		0,01
Maximální rychlost (m s ⁻¹)	180			
Nejistota směru (°)	2	1		2
Rozlišení směru (°)	0,1			0,1

Příloha B

Seznam použitých komponent

Značka	Označení	Počet	Jednotková cena (Kč)
U1	TPS63001DRCT	1	84,53
U2	STM32L151CBT6A	1	142,32
U3	MTX2-434.650-10	1	957,53
U4	ICM-20608-G	1	176,26
U5	MCP3423-E/UN	1	86,68
U6	HIH8131-021-001	1	287,35
U7	MS5611-01BA03	1	312,95
U8	MAX-M8Q-0	1	572,07
U9	MCP3421A1T-E/CH	1	56,80
R1, R27, R28	CQ0603-100R-1%	3	0,52
R2, R3, R11, R12	SMD0603-4K7-1%	4	0,25
R4, R5, R16, R33	CQ0603-10K-1%	4	0,52
R6, R7, R14, R15	TC0325B4701T1E	4	3,08
R8, R9, R17-20, R29, R30	CQ0603-22R-1%	8	0,52
R10, R21, R23-26	CQ0603-47K-1%	6	0,52
R13	ERA3AEB113V	1	2,61
R32	CQ0603-10R-1%	1	0,51
TH1	PT1000-550	1	85,03
C1, C3, C4, C14, C20, C29	CL10A106MQ8NNNC	6	9,51
C2, C5-C13, C15, C17, C18, C21, C23-27, C30, C32	CL10B104KO8NNNC	21	4,35
C16, C22, C28	CL10B103KC8NNNC	3,	3,69
C19, C31	TPSA106K006R150	2	7,58

D2, D3	LTST-C193TGKT-5A		4,33
FB1, FB2	BLM18AG102SN1D	2	4,86
J1	BH-321A	1	9,73
J2	ZL319-5P	1	4,54
J3, J7	ZL319-4P	2	4,19
J4	RF2145AT1750GHDW	1	38,76
J5	DM3BT-DSF-PEJS/C	1	84,08
J6	A-1JB	1	36,68
L1	DJNR3015-2R2	1	30,43
L2	LQW18AN33NG00D	1	3,87
	ANT-433-CW-RH-SMA	1	225,71
	GPS-ANT048	1	177,67

Celkový součet

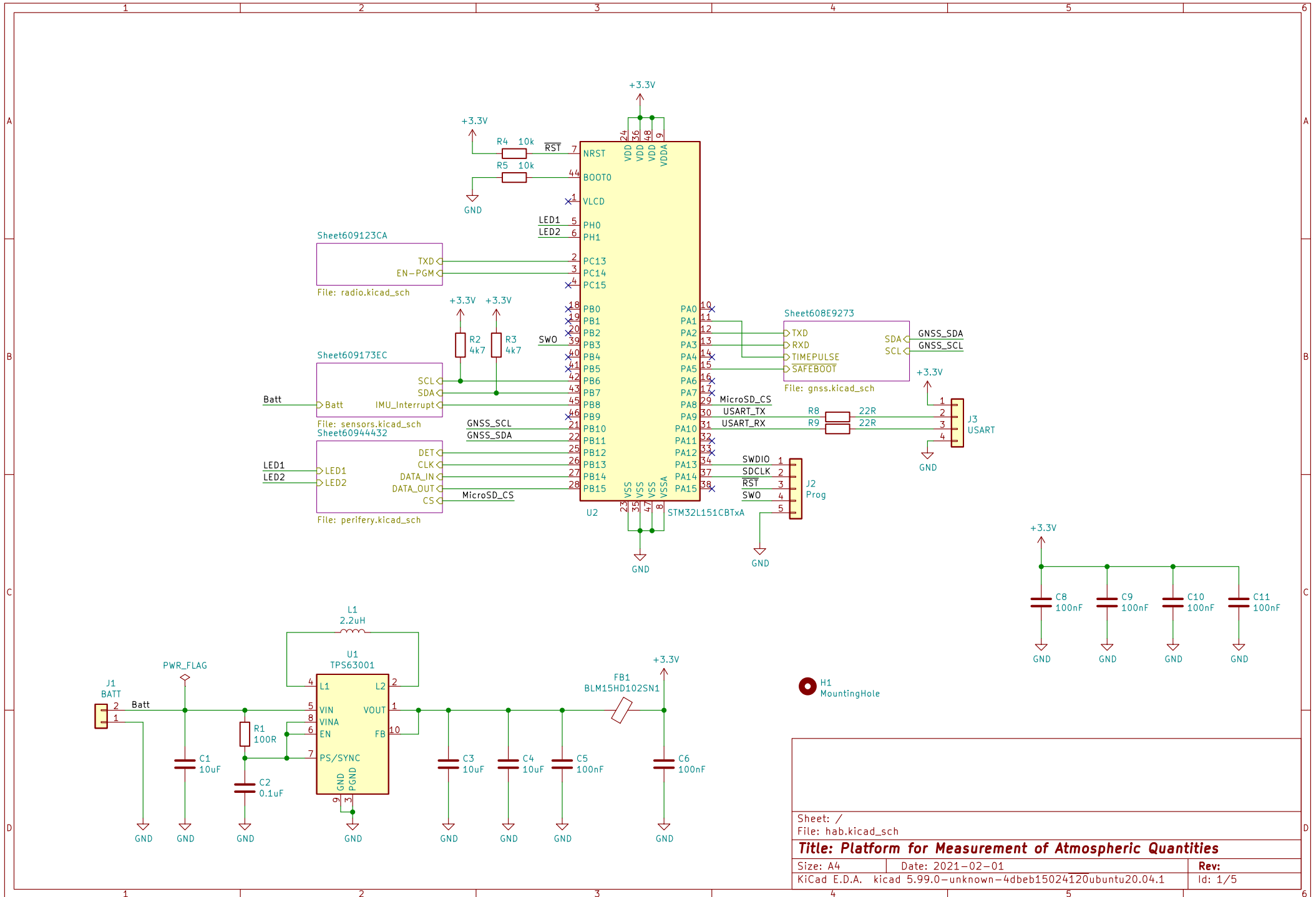
Příloha C

Seznam zaznamenávaných veličin

Veličina	Desetinná místa	Příklad hodnoty	Jednotka
Čas	0	124 864	ms
Sekvence	0	51 980	1
Teplota vzduchu	2	+24.70	°C
Napájecí napětí	2	3.28	V
Napětí na baterii	2	3.02	V
Relativní vlhkost	0	54.25	%RH
Teplota na <i>HIH8131</i>	2	+25.32	°C
Atmosférický tlak	2	993.38	Pa
Teplota na <i>MS5611</i>	2	+25.38	°C
Úhlová rychlost v ose x	2	-0.15	°s ⁻¹
Úhlová rychlost v ose y	2	+0.12	°s ⁻¹
Úhlová rychlost v ose z	2	+0.08	°s ⁻¹
Zrychlení v ose x	2	-0.07	m s ⁻²
Zrychlení v ose y	2	+5.04	m s ⁻²
Zrychlení v ose z	2	+8.81	m s ⁻²
Teplota na <i>ICM-20608-G</i>	2	+22.35	°C
Čas GNSS	0	09 57 43	HHMMSS
Zeměpisná šířka	7	49.226 809 0N	°
Zeměpisná délka	7	16.595 542 0E	°
Nadmořská výška	1	276.4	m
Rychlost na zemi	2	0.60	ms ⁻¹
Azimut	2	168.19	°
Datum	0	26 04 21	DDMMYY
Počet satelitů	0	8	
Mód fixace GNSS	0	1	

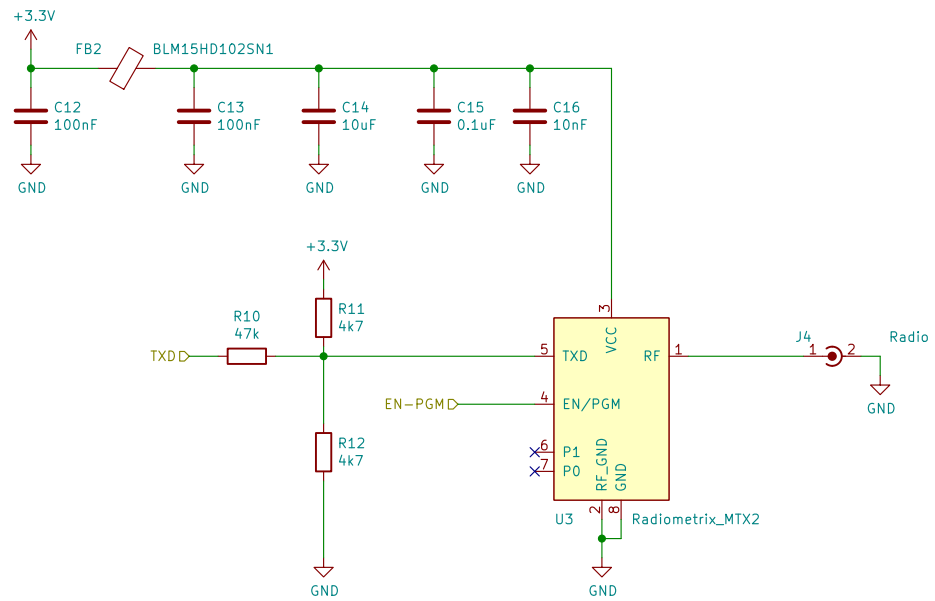
Příloha D

Obvodové schéma sondy



H1 MountingHole

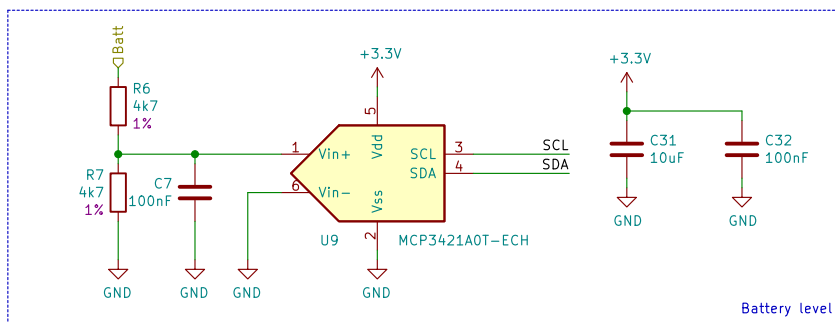
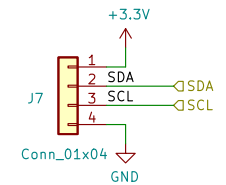
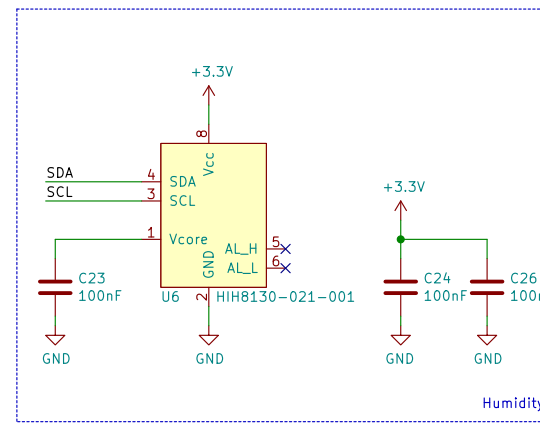
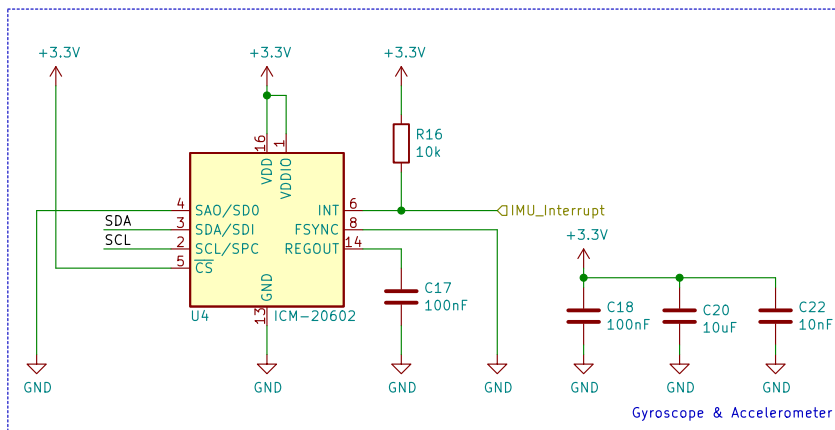
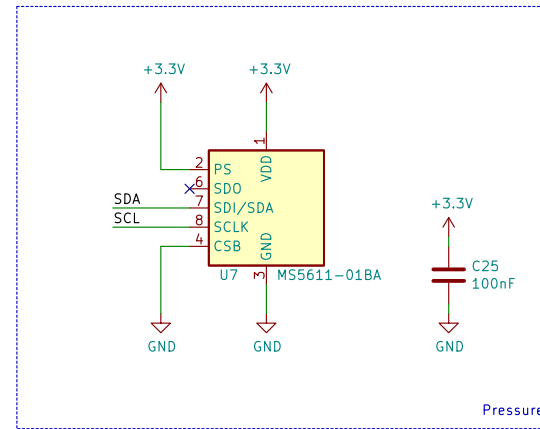
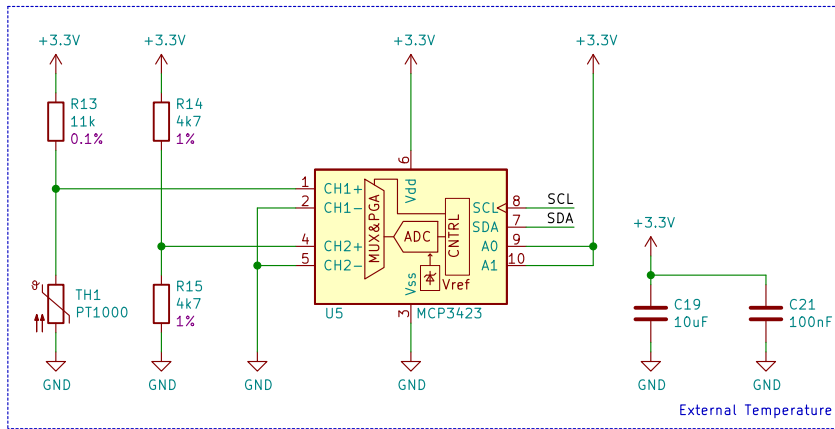
Sheet: /		
File: hab.kicad_sch		
Title: Platform for Measurement of Atmospheric Quantities		
Size: A4	Date: 2021-02-01	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 5.99.0-unknown-4dbeb15024120ubuntu20.04.1		Id: 1/5



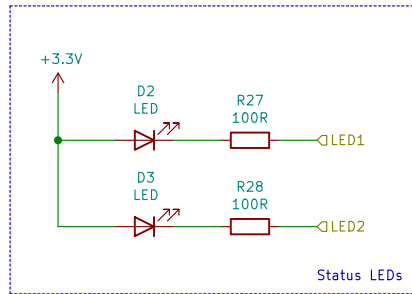
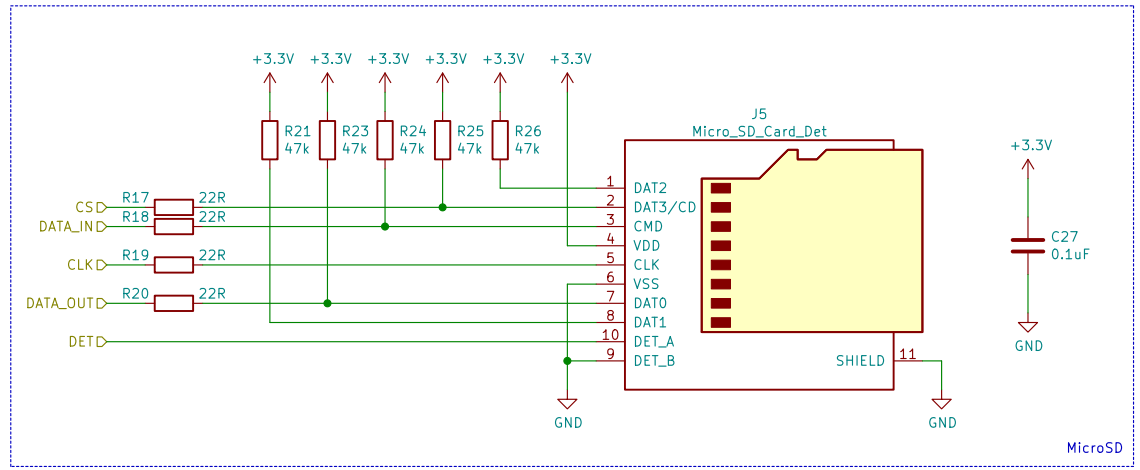
Sheet: /Sheet609123CA/
 File: radio.kicad_sch

Title: Platform for Measurement of Atmospheric Quantities

Size: A4	Date: 2021-02-01	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 5.99.0-unknown-4dbeb15024120ubuntu20.04.1		Id: 2/5



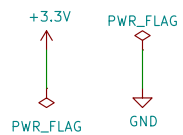
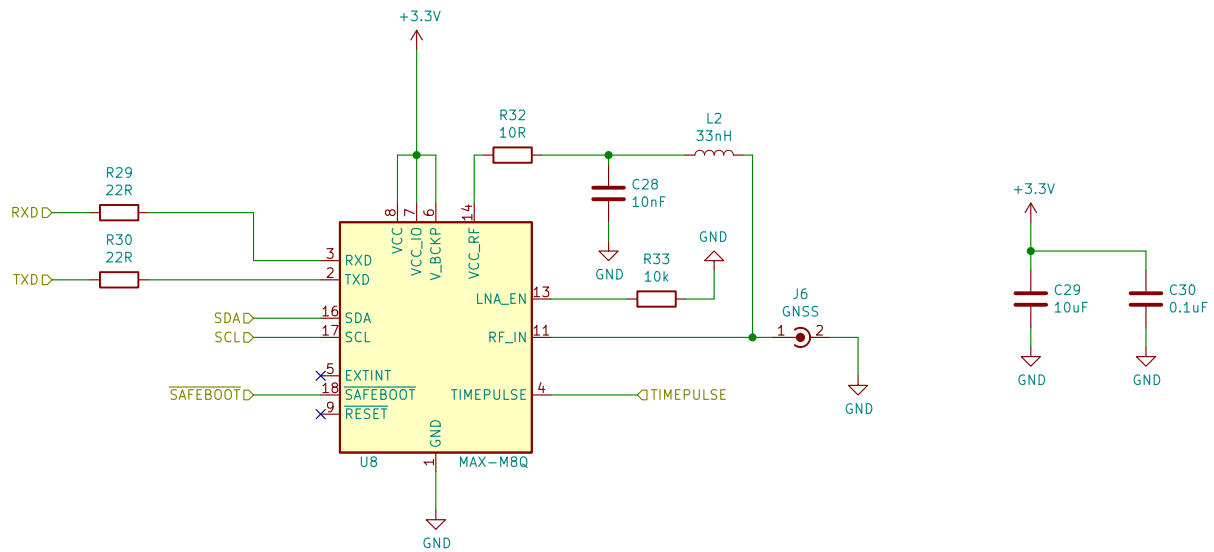
Sheet: /Sheet609173EC/		
File: sensors.kicad_sch		
Title: Platform for Measurement of Atmospheric Quantities		
Size: A4	Date: 2021-02-01	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 5.99.0-unknown-78b555afa2127ubuntu20.04.1		Id: 3/5



Sheet: /Sheet60944432/
 File: periphery.kicad_sch

Title: Platform for Measurement of Atmospheric Quantities

Size: A4	Date: 2021-02-01	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 5.99.0-unknown-4dbb15024120ubuntu20.04.1		Id: 4/5



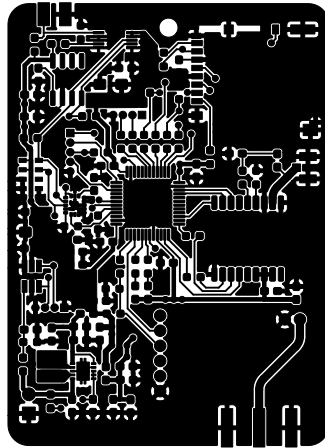
Sheet: /Sheet608E9273/
 File: gnss.kicad_sch

Title: Platform for Measurement of Atmospheric Quantities

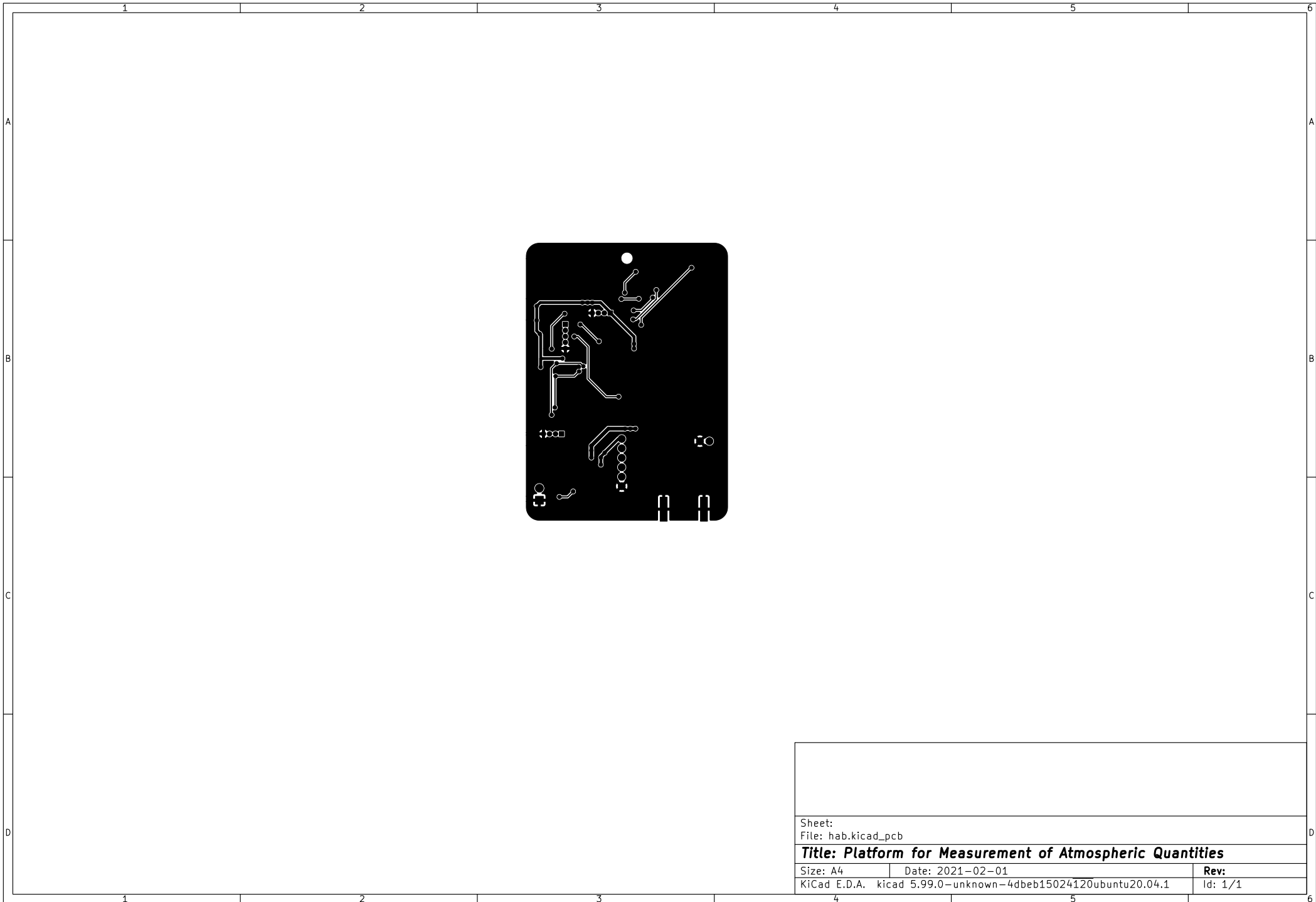
Size: A4	Date: 2021-02-01	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 5.99.0-unknown-4dbeb15024120ubuntu20.04.1		Id: 5/5

Příloha E

Plošný spoj sondy



Sheet:		
File: hab.kicad_pcb		
Title: Platform for Measurement of Atmospheric Quantities		
Size: A4	Date: 2021-02-01	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 5.99.0-unknown-4dbeb15024120ubuntu20.04.1	Id: 1/1	



Sheet:		
File: hab.kicad_pcb		
Title: Platform for Measurement of Atmospheric Quantities		
Size: A4	Date: 2021-02-01	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 5.99.0-unknown-4dbeb15024120ubuntu20.04.1	Id: 1/1	

Příloha F

Fotodokumentace sondy



Obrázek F.1: Uložení platformy v polystyrenovém obalu.



Obrázek F.2: Zadní strana platformy.



Obrázek F.3: Místo dopadu prvního letového experimentu.



Obrázek F.4: Letová soustava při čekání na start druhého letového experimentu.



Obrázek F.5: Průběh letového experimentu.



Obrázek F.6: Místo dopadu druhého letového experimentu.

Příloha G

Kalibrační list MS5611-01BA03

KALIBRAČNÍ LIST

č. 1249/21



BD SENSORS
tlakoměrná technika

Kalibrační laboratoř

Hradištská 817, 687 08 Buchlovice
tel: 572 411 011

Strana 1 z 2

Zákazník:

FIT VUT v Brně
Božetěchova 2/1
612 00 Brno

Datum kalibrace:

14.05.2021

Identifikace měřidla:

Název měřidla:	číslicový tlakoměr absolutního tlaku
Typ:	MS5611-01BA03
Výrobce:	TE connectivity
Měřicí rozsah:	(10 až 1200) mbar
Výstup:	údaj displeje
Přesnost udávaná výrobcem:	± 1,5 mbar

Použité etalony a další přístroje:

- kalibrátor tlaku DHI, typ PPC3-200K A160Kp/BG15Kp, v.č. 706

Použité etalony a další přístroje mají zajištěnou návaznost na národní etalony prostřednictvím etalonů ČMI nebo etalonů akreditovaných kalibračních laboratoří.

Kalibrační postup:

KP-802 Kalibrační postup BD SENSORS - Elektromechanické tlakoměry

Podmínky, za kterých byla kalibrace provedena:

- teplota okolí 18 °C až 25 °C;
- relativní vlhkost 20 % až 80 %;
- tlakové médium - dusík;
- tlakoměr nebyl nastaven.

Výsledky kalibrace:

p_{REF}	p_{DUT} nahoru	p_{DUT} dolů	chyba nahoru	chyba dolů	nejistota	největší dovolená chyba
(mbar)	(mbar)	(mbar)	(mbar)	(mbar)	(mbar)	(mbar)
10,00	8,34	8,38	-1,66	-1,62	0,07	1,50
240,00	239,11	239,20	-0,89	-0,80	0,07	1,50
480,00	479,93	479,98	-0,07	-0,02	0,08	1,50
720,00	720,59	720,63	0,59	0,63	0,10	1,50
960,00	960,83	960,85	0,83	0,85	0,12	1,50
1200,00	1200,39	1200,40	0,39	0,40	0,15	1,50

p_{REF} - referenční hodnota tlaku, reprezentovaná použitým etalonem tlaku

p_{DUT} - údaj kalibrovaného tlakoměru

Chyba, nejistota i dovolená chyba jsou vyjádřeny v jednotkách tlaku nebo formou relativní hodnoty, a to v % z měřené hodnoty (% rdg), z horní meze měřicího rozsahu (% URL) nebo z rozpětí (% span).

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2,32$; což pro t-rozdělení s $\nu_{eff} = 9$ efektivními stupni volnosti odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.

Tento kalibrační list nesmí být bez písemného souhlasu laboratoře reprodukován jinak, než celý. Výsledky kalibrace se vztahují pouze ke kalibrovanému tlakoměru.

Datum vydání: 14.05.2021

Schválil:



.....
Mgr. Ivo Vaverka
zástupce vedoucího laboratoře