



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Experimentální měření na frekvenci 1030/1090 MHz pomocí UAS
Experimental Measurement at 1030/1090 MHz using UAS

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: doc. Ing. Jakub Kraus Ph.D.

Ing. Stanislav Kušmírek

Bc. Karel Kédl

Praha 2023



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Karel Kédl

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Experimentální měření na frekvenci**

1030/1090MHz pomocí UAS

Název tématu (anglicky): **Experimental Measurement at 1030/1090MHz Using UAS**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je sestavit záznamové zařízení s SDR přijímačem určené pro kontrolu pásma 1030/1090MHz, vykonat experimentální měření a vyhodnotit naměřená data z pohledu pokrytí vybrané části vzdušného prostoru přehledovým systémem.
- Vypracujte analýzu současného stavu možností ověřování leteckých frekvenčních pásem.
- Určete klíčové parametry záznamového zařízení a bezpilotního prostředku nutné k vykonání leteckého měření frekvenčního pásma.
- Sestavte záznamové zařízení v podobě on-board počítače a SDR přijímače, které budou schopné nahrávat na interní paměť signál v leteckém pásmu 1030/1090MHz. Umožněte bezdrátovou komunikaci počítače s pozemní základnou přes ssh konfiguraci.
- Vykonejte letecké experimentální měření pro frekvenci 1030/1090MHz a analyzujte získaná data.
- Formulujte limitace a závěry práce.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Ministerstvo dopravy: Letecký předpis o civilní telekomunikační službě - L10
Junzi Sun: The 1090 Megahertz Riddle (second edition), A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals. 2021

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**
Ing. Stanislav Kušmírek

Datum zadání diplomové práce: **16. července 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2023**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

.....
doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



.....
prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

.....
Bc. Karel Kédli
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. května 2023



Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo navržení záznamového zařízení s SDR přijímačem pro záznam a vyhodnocení pásma 1030/1090 MHz. Hlavní část zpracování signálu je program pro úpravu dat k vyhodnocení. Program je vytvořen v programovacím jazyku python a jeho výstupem je datový soubor a soubor metadat. Formát dat je vhodný pro zpracování programem dump1030, jehož výstupem je počet dotazů jednotlivých módů SSR.

Klíčová slova: sekundární radar, softwérově definované rádio, záznam signálu



Abstract

The aim of this thesis was to design a recording device with SDR receiver for recording and evaluation of 1030/1090 MHz band. The main part of the signal processing is a program to modify the data for evaluation. The program is developed in python programming language and its output is a data file and a metadata file. The format of the data is suitable for processing by the dump1030 program whose output is the number of queries of each SSR mode.

Keywords: secondary radar, software defined radio, signal capture



Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mne při tvorbě této práce podporovali. Obzvláště Ing. Michalu Černému za 3D tisk a provedení letu s dronem a dále vedoucímu práce doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. za cenné podněty.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Experimentální měření na frekvenci 1030/1090 MHz pomocí UAS vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Praze dne 30. listopadu

.....

Podpis



Obsah

Úvod	11
1 Současný stav problematiky	12
1.1 Přřazení frekvencí	13
1.2 Měření a monitorování frekvenčního pásma	15
1.2.1 Letová ověřování leteckých pozemních zařízení	15
1.2.2 Letové monitorování	16
1.2.3 Pozemní monitorování	17
1.3 Interference	18
1.3.1 FRUIT	20
1.3.2 Garbling	20
1.3.3 Opatření ke snížení interference	20
1.4 SDR přijímače	21
1.4.1 Použití SDR ve sledování leteckého provozu	24
1.5 Sekundární přehledový radar	26
1.5.1 1030 MHz	26
1.5.2 1090 MHz	28
1.6 Limitace současného stavu	29
2 Metodika řešení	31
2.1 Záznamové zařízení (hardware)	31
2.1.1 Raspberry	31
2.1.2 Napájení	33
2.1.3 Pluto SDR	34
2.1.4 RTL-SDR	34
2.1.5 Anténní část	36
2.2 Záznamový skript (software)	36
2.2.1 GNU radio	37
2.2.2 Spuštění skriptu	39
2.2.3 dump1030	41



2.2.4	Python	42
2.2.5	L ^A T _E X	44
2.2.6	Struktura dat	44
2.3	Bezpilotní prostředek	45
2.4	Letové měření	47
2.5	Záznam dat	48
2.6	Zpracování signálu	51
2.6.1	Resampler2sigmf	51
2.6.2	1030.report	52
3	Prezentace výsledků	56
3.1	Finální verze platformy	57
3.2	Výsledky měření	60
3.2.1	28.4. výsledky měření	61
3.2.2	30. 6. výsledky měření 1. let	67
3.2.3	30.6. výsledky měření 2. let	70
3.2.4	30.6. výsledky měření 3. let	73
4	Diskuze výsledků	76
5	Závěr	79
	Seznam použité literatury	81
	Přílohy	85



Seznam obrázků

1.1	Porovnání značení spektra radiových vln	12
1.2	Obsazení pásma L kolem SSR	14
1.3	Dosah měření	17
1.4	SDR přijímač	23
1.5	Konstelační diagram a) DPSK b) PPM	27
1.6	Dotaz Múd A a C [17]	28
1.7	Dotaz Múd S [17]	28
2.1	Blokové schéma sestavy	32
2.2	Limity vyzařování pro dotazovač [17]	35
2.3	Pluto SDR [11]	36
2.4	Resample GNU radio	40
2.5	Prostor pro zavěšení užitečného zatížení	46
2.6	Kompletní 3D sestava z horního pohledu DJI 600 PRO	47
2.7	Kompletní 3D sestava z horního pohledu DJI 300 RTK	48
2.8	Měření a okolní SSR	49
2.9	Blokové schéma hardwaru v den měření 28.4.	50
2.10	Změna vzorkovací frekvence a datového typu	52
2.11	Resample GNUradio	52
2.12	Datové typy v GNUradio	53
2.13	Vývojový diagram report_1030.py	54
2.14	Kontrolní tisky programu report 1030	55
3.1	3D model	56
3.2	Blokové schéma sestavy	57
3.3	Vertikální profil celého letu z 28.4.	58
3.4	Nastoupaná výška v průběhu záznamu dat 28.4.	59
3.5	rekonstrukce profilu letu z 30.6.	60
3.6	DJI M600 PRO s měřícím přístrojem se svolením autora	62
3.7	Situace měření s trasou letu	62
3.8	Počet dotazů mód S	63



3.9	Počet dotazů mód A	63
3.10	Počet dotazů mód C	64
3.11	Počet dotazů mód A all	64
3.12	Počet dotazů mód C all	65
3.13	Počet dotazů mód A comp	65
3.14	Počet dotazů módů A,C	66
3.15	Počet dotazů mód A 30.6. 1. let	67
3.16	Počet dotazů mód C 30.6. 1. let	68
3.17	Počet dotazů mód S 30.6. 1. let	68
3.18	Počet dotazů mód A 30.6. 2. let	71
3.19	Počet dotazů mód C 30.6. 2. let	71
3.20	Počet dotazů mód S 30.6. 2. let	72
3.21	Počet dotazů mód A	74
3.22	Počet dotazů mód C	74
3.23	Počet dotazů mód S	75
4.1	Vykreslení průběhu stoupání spolu s dotazy módu S	77
4.2	Rádiová viditelnost SSR Praha	77
4.3	Rádiová viditelnost SSR Praha	78



Seznam tabulek

1.1	Přehled některých SDR přijímačů a jejich parametrů	24
1.2	Vzestupný spoj, sestupný spoj 1030/1090 MHz	27
2.1	Parametry použitých antén	37
2.2	Výstup programu dump1030	42
2.3	Porovnání API RTL-SDR a pluto SDR	43
2.4	Výčet proměnných použitých v šabloně	45
2.5	Porovnání parametrů dronů [26],[21]	47
2.6	Souřadnice místa měření a okolních SSR radarů	48
3.1	Záznam dat jednotlivých letů	61
3.2	Výstup programu dump1030 měření 28.4.	66
3.3	Výstup programu dump1030 30.6. 1. let	69
3.4	Výstup programu dump1030	72
3.5	Výstup programu dump1030	75



Seznam symbolů a zkratek

ADC	(Analog/Digital Converter)
AGC	(Automatic Gain Control)
AGL	Výška nad zemí (Above Ground Level)
ARNS	Letecké radionavigační služby (Aeronautical radionavigation services)
ATCRBS	Air Traffic Control Radar Beacon System
DATAS	Systém pro zkoušení a analýzu datalinku (Data Link Test and Analysis System)
DPSK	Diferenciální fázová modulace (Differential Phase Shift Keying)
DSP	Číslicové Zpracování Signálu (Digital Signal Processing)
EMIT	European Monitoring of Interrogators and Transponders
EMS	Evropská Mode S přehledová stanice (European Mode S Station)
FPGA	Programovatelné hradlové pole (Field Programmable Gate Array)
FRUIT	(False Replies Unsynchronised In Time)
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IIO	Industrial Input Output
ITU	Mezinárodní Telekomunikační Unie (International Telecommunication Union)
JTIDS	Joint Tactical Information Distribution System
LNA	Nízkošumový zesilovač (Low Noise Amplifier)
LPZ	Letecká pozemní zařízení
MIMO	(Multiple Input Multiple Output)
MTL	Minimální spouštěcí úroveň (Minimum Triggering Level)
PPM	Pulzně polohová modulace (Pulse Position Modulation)
RED	Radio Equipment Directive
RPAS	Remoted Piloted Aircraft System
RR	Radiokomunikační řád (Radio Regulation)
SDR	Softwarově definované rádio (Software Defined Radio)
SIGINT	Signálové zpravodajství (Signal Intelligence)
SISO	(Single Input Single Output)
SLS	Potlačení bočních laloků
SNR	Odstup signálu od šumu (Signal-to-Noise Ratio)
SPI IR	Surveillance Performance and Interoperability Implementing Rule
sps	vzorků za sekundu (samples per second)
SSR	Sekundární přehledový radar
UAT	(Universal Access Transceiver)
UAV	(Unmanned Aircraft Vehicle)



Úvod

Monitorování a měření pásma 1030/1090 MHz je nezbytné pro hodnocení výkonnosti a dostupnosti přehledových systémů a zajištění možnosti používání pásma i v budoucnu. S tím jak se letecká doprava v některých místech koncentruje, může docházet k nežádoucím výpadkům dat a nebo přetěžování některých komponent v řetězci kooperativních systémů.

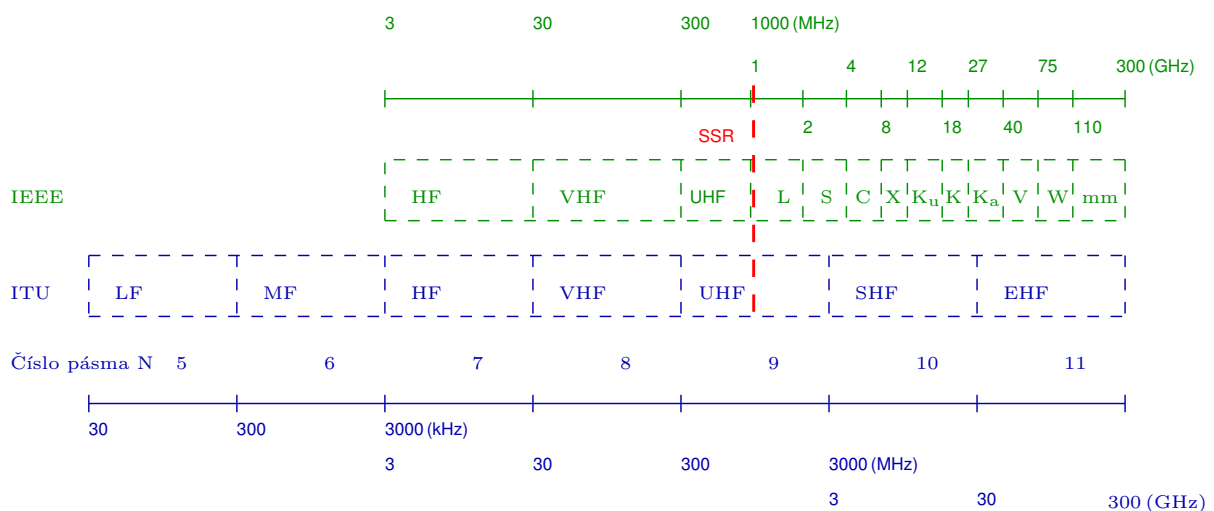
Monitorování a ověřování je možné provádět různými způsoby. Jsou permanentní pozemní stanice nepřetržitě vyhodnocující éter na frekvencích 1030/1090 MHz, jsou letadlové obletové laboratoře pro přesné certifikované měření a hodnocení signálů leteckých radionavigačních a přehledových prostředků. A v poslední době se prosazují také bezpilotní systémy.

Cílem práce je sestavit vhodný hardware pro montáž na bezpilotní prostředek. Pro příjem a záznam signálu poslouží dostupné softwarově definované rádio (SDR - Software Defined Radio). Pomocí prostředků digitálního zpracování signálů bude provedeno vyhodnocení.



1 Současný stav problematiky

Rádiovými vlnami nazýváme část spektra elektromagnetického záření 30 Hz - 300 GHz. V těchto frekvencích je standardizované značení podle radioregulačního řádu Mezinárodní telekomunikační unie (ITU - International Telecommunication Union) RR2-1 [1]. Značení ITU je matematicky systematické a používá číslo pásma viz obrázek 1.1 jako exponent ve vzorci $0,3 \cdot 10^N$ až $3 \cdot 10^N$. Nicméně více se používá pro rozdělení spektra rádiových vln označení Institutu pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers) [2]. Norma byla specificky vymezená pro použití označení pracovních pásem radarů, ale ujala se i pro širší použití v satelitní komunikaci, radionavigaci a telekomunikacích, např. starlink síť internetového satelitního připojení firmy SpaceX používá pásma K_u , K_a a V s přesahy do X a K . Pro telekomunikační síť 5G pásma frekvencí 24 - 54 GHz se používá také označení mm vlny, což nesouvisí ani s jedním systémem značení, označení mm v tomto případě vyjadřuje jen milimetrovou vlnovou délku 12,5 mm - 5,5 mm. Na obrázku 1.1 je porovnání označení rozsahu frekvencí 30 MHz - 300 GHz a orientační umístění frekvence sekundárního přehledového radaru (SSR).



Obrázek 1.1: Porovnání značení spektra rádiových vln



Telekomunikační, rozhlasové, radionavigační, letecké přehledové služby a další vojenské i civilní služby se musí spokojit s jedním společným spektrem radiových vln k pokrytí svých potřeb. Poptávka po volných komunikačních pásmech roste a frekvencí více nebude.

ITU je agentura spojených národů pro rozvoj a standardizaci telekomunikačních technologií. Prostřednictvím radiotelekomunikačního řádu a vydaných doporučení řídí nejen koordinaci přidělování kmitočtů na mezinárodní úrovni včetně leteckých služeb ve spolupráci s (ICAO - International Civil Aviation Organization), stanovuje také podmínky používání radiostanic, klasifikaci vysílačů, protiprávní jednání.

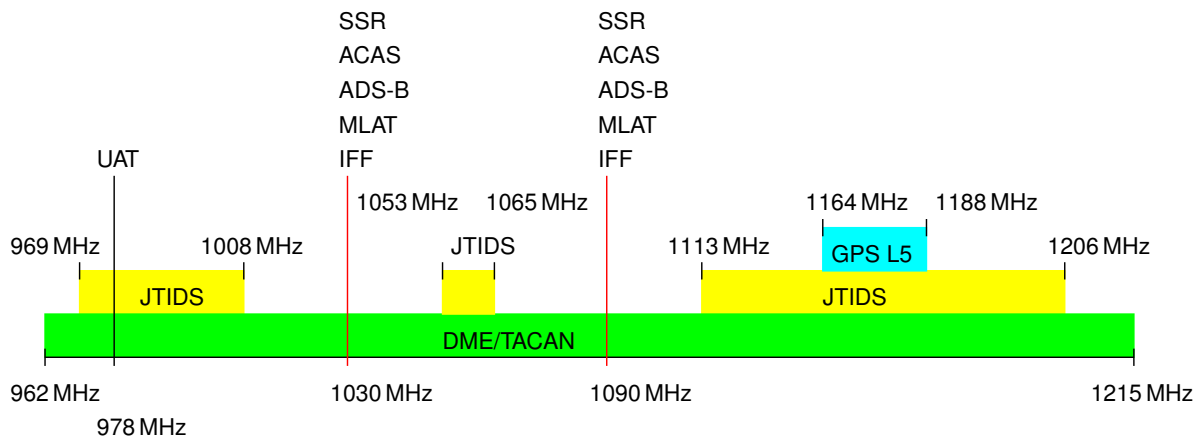
Službám jsou přidělena pásma tak, aby se vzájemně co nejméně překrývala a nedocházelo k rušení. Nosná frekvence se vybírá podle vlastností šíření vln. Na nosnou frekvenci se modulují přenášené informace. Vlny v pásmu L mají vlastnosti šíření na přímou radiovou viditelnost a šíří se bez problémů skrz oblačnost, mlhu, déšť a vegetaci. Podle rozdělení ITU pracuje SSR ve spodním okraji pásma L 1030 a 1090 MHz. Pásmo L používají také další služby mimo přehledových služeb v letectví. Satelitní navigace GPS používá pásmo L, konkrétně 1176,45 MHz (L5), 1227,60 MHz (L2), 1381,05 MHz (L3), 1575,42 MHz (L1). Iridium 1616 - 1626,5 MHz, Inmarsat 1525 - 1646,5 MHz, Satelitní telefony 1525 - 1661 MHz, amatérské rádio 1240 - 1300 MHz, amatérský satelit up-link 1260 - 1270 MHz.

1.1 Přirazení frekvencí

Dle radiotelekomunikačního řádu RR 5-63 článek 5.328 je pásmo 960 - 1215 MHz celosvětově vyhrazeno pro letecké radionavigační služby (ARNS - Aeronautical radionavigation services) a je chráněno [1]. Na obrázku 1.2 je vyznačeno vymezení služeb ARNS podle nosné frekvence. Z mezinárodní, úrovně je přiřazení frekvencí v České republice aplikováno v plánu pro přiřazení frekvencí, které vymezuje přiřazení jednotlivým službám [6].

Přiřazení frekvencí různým službám je základní stupeň ochrany daných služeb proti rušení. Když už přidělené pásmo nestačí, musí se přijmout opatření, jelikož zpravidla není možné rozšiřovat vymezení frekvencí jedné služby na úkor dalších sousedních, znamená to přizpůsobení komunikačního kanálu.

Způsobů, jak zvýšit kapacitu pásma, není mnoho a pokaždé si vynutí výměnu drahých hardwarových komponent. V letectví máme jasný příklad podobné situace, kdy se v Evropě u hlasové komunikace VHF 118 - 137,975 MHz přecházelo z kanálového odstupu 25 kHz na 8,33 kHz. To se dělo z důvodu



Obrázek 1.2: Obsazení pásma L kolem SSR

zahuštěného letového provozu nad Evropou a potřebou více komunikačních kanálů pro řízení letového provozu. Rozteč 25 kHz znamenala 760 dostupných komunikačních kanálů. Ale pokud půjdeme dále do minulosti, zjistíme, že do roku 1947 bylo pouze 70 kanálů pro hlasovou komunikaci v rozmezí frekvencí 118 - 132 MHz s roztečí mezi kanály 200 kHz. V několika vlnách se pásmo dále zahušťovalo provozem a kanálová rozteč byla zmenšována. V letech 1947 až 1958 100 kHz, od roku 1954 50 kHz a byly přidány frekvence do 135,95 MHz, to znamenalo zvýšení na 360 dostupných komunikačních kanálů. Rok 1972 opět znamenal snížení rozstupů na 25 kHz a v roce 1990 frekvence 136 - 136,975 MHz. Letecké radiostanice pro hlasovou komunikaci byly analogové. Proto pokaždé muselo dojít k výměně radiostanice. Dnes už to není tak docela pravda a přinejmenším některé části jsou digitální.

Odpovídače prošly podobným vývojem s výměnou hardwaru. Na počátku se odpovídače používaly pouze ve vojenských letadlech pro rozlišení vlastní nebo cizí IFF (Identification Friend or Foe). Rozšíření na identifikaci civilních letadel je aplikace módu A. Mód C přinesl hlášení nadmořské výšky. Poslední iterace odpovídače je mód S, který zavedl adresné dotazování a přidělení každému odpovídači unikátní 24 bitové ICAO adresy. S aplikací ADS-B na 1090ES přišlo automatické hlášení polohy na základě satelitní navigace v letadle. Důvodem pro výměny odpovídačů bylo rozšiřování schopností a rozšíření přenášených parametrů k řídicímu letového provozu a problémy s přetížením komunikačního kanálu 1030 a 1090 MHz.



1.2 Měření a monitorování frekvenčního pásma

Letové ověřování je nutné k ověření parametrů vysílačů, přijímačů a systémů pozemního radionavigačního a přehledového zařízení. Letovým monitorováním frekvenčního pásma lze také potvrzovat výsledky modelů simulující zatížení komunikačního kanálu a nebo získat zpřesňující parametry pro tyto modely. Některé přehledové systémy jsou zranitelné vůči vysílání falešných, podvržených ADS-B zpráv a rušení. Pozemní kontinuální monitorování může poskytovat v reálném čase údaje o využití konkrétního komunikačního kanálu a výkonnosti přehledového systému, může zaznamenat a určit polohu neoprávněného vysílání a zhoršení sledovaných parametrů výkonnosti, ale má své limity.

1.2.1 Letová ověřování leteckých pozemních zařízení

Dodatek N předpisu L10/I udává rozsahy a intervaly letových ověřování (LPZ - Leteckých Pozemních Zařízení). Rozsah a lhůty ověřování jsou stanoveny v dodatku N k předpisu L10. Pro pozemní dotazovač SSR platí interval 720 dnů s tolerancí 30 dnů, ale nemusí se provádět obletovou laboratoří, protože dodatek N uvádí, že parametry lze ověřit pomocí připravených postupů a softwarových nástrojů zpracováním dat, získaných z běžného provozu [9].

Cílem letového ověření je určení a kontrola dosahu a přesnosti SSR. Důvody k ověření parametrů SSR pomocí obletové laboratoře jsou mimořádná letová ověřování. Mimořádné letové ověřování je nutné v případech:

- instalace významné opravy, konstrukční změny, modifikace,
- narušení ochranného pásma, ovlivnění (OPZ - osvědčení provozní působivosti) stavební činnosti,
- na vyžádání v odůvodněných případech (státní dozor).

Odůvodněným případem je například incident u kterého by mohl být přispívající faktor výkonnost zařízení mimo minimální specifikace výkonnosti.

Letové ověřování SSR se provádí upraveným, kalibrovaným a certifikovaným odpovídačem instalovaným na palubě obletové laboratoře, ŘLP s.p. nabízí službu letového ověřování pomocí letounu Beechcraft King Air 350 se systémem AeroFIS® od společnosti Aerodata AG. Tento systém má také funkci pro detekci a lokalizaci rušivého vysílání.



Podle článku 6 nařízení komise č. 1207/2011 Opatření k ochraně spektra, nesmějí být odpovídače vystaveny nadměrným dotazům z pozemních dotazovačů a žádný pozemní dotazovač nesmí způsobit škodlivou interferenci jinému přehledovému systému [3]. Monitorování frekvencí může být letové, pozemní.

1.2.2 Letové monitorování

Monitorování frekvencí slouží spíše jako prostředek k získání dat k poznání skutečného provozu na frekvencích přehledových služeb a jakým způsobem jej ovlivňuje zavádění nových požadavků a systémů v průběhu dekád. Výhodou letového monitorování oproti pozemnímu je větší pokrytí a ověření reálného zatížení frekvence v prostoru.

V roce 1995 provedl tým FAA letová měření vzestupného spoje mod S v oblasti letišť Frankfurt a Mnichov spolu s dotazy TCAS za použití systému pro zkoušení a analýzu datalinku (DATAS - Data Link Test and Analysis System). Nejvyšší počet dotazů mod S zaznamenaných za jednu sekundu byl 285 s průměrnou hodnotou po dobu letu 114 dotazů za sekundu. Průměrný počet dotazů za sekundu módu A byl 130 a módu C 80. Dostupnost odpovídače byla průměrně 91 %. Součástí této kampaně bylo i pozemní zachycení počtu odpovědí módů A, C a S. Počet odpovědí módů A a C se pohyboval mezi 10 000 a 15 000 se špičkou 17 000 odpovědí zaznamenaných odpovědí za sekundu. Zaznamenaný počet odpovědí módu S se držel na hodnotách 150 až 200 odpovědí za sekundu [14].

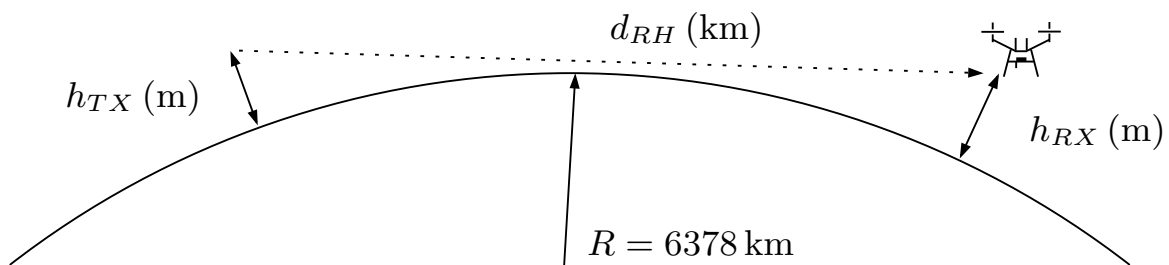
V souvislosti se zaváděním ADS-B na 1090ES v roce 2007 provedlo FAA letové měření frekvencí 1030 a 1090 MHz s upraveným odpovídačem pro záznam dotazů i odpovědí. Jedním z výsledků bylo, že v blízkosti oblasti s hustým provozem klesla dostupnost odpovídače z více než 90 % na 82 %. Bylo doporučeno vyjmout povinnost odpovídače odpovídat na dotazy A/C/S all call a dále pravidelně provádět monitorovací lety pro sledování trendů [8].

Práce MIT v roce 2010 se soustředila na zhodnocení vlivu TCAS na prostředí a zatížení frekvencí 1030/1090 MHz. K tomuto účelu byla vyvinuta řada nástrojů k automatizaci vyhodnocení naměřených dat. V tomto měření nebyl vyhodnocen žádný problém ohledně koordinace letadel systémem TCAS [15].

V roce 2018 provedli výzkumníci v Japonsku statistickou analýzu signálů na frekvenci 1090 MHz. Během letu po dobu 10 minut pomocí spektrometru s 16bitovým převodníkem analogového signálu na digitální (ADC - Analog Digital Converter) zaznamenávali signál. Výsledný histogram počtu signálů

se jeví, že má Poissonovo rozdělení, ale je potřeba zpracovat data z většího vzorku za delší časový úsek a porovnat data s více statistickými funkcemi [16].

Firma Flight Calibration service nabízí dron pro měření radarových frekvencí PSR i SSR. Letový monitoring narozdíl od pozemního přijímače má výhodu v nestíněné přímé viditelnosti do všech stran a větší dosah měření. Primoco UAV spolu s NSM group nabízí bezpilotní systém pro letové ověřování LPZ založený na bezpilotním letounu Primoco UAV one 150 s instalovaným systémem NSM unifis 1000 (RPAS - Remoted Piloted Aircraft System). Unifis 1000 je odvozen od plno rozměrového unifis 3000 s rozhraním pro operátora na palubě letadla, jehož součástí je odpovídač. Systém unifis 3000 také v minulosti používalo řlp na letounu C560. Firma T-CZ nabízí monitorovací stanici Simon pro frekvence 1090/1030 MHz, které údajně vyhovuje nařízení 1207/2011.



Obrázek 1.3: Dosah měření

$$d_{RH} = 3,57 \left(\sqrt{h_{TX}} + \sqrt{h_{RX}} \right) \quad (1.1)$$

Měření pomocí dronu mírně zvyšuje dosah měření, navíc přináší výhodu úspory nákladů na let. Pokud bude vysílač ve výšce $h_{TX} = 20 \text{ m}$ a měřící dron ve výšce $h_{RX} = 500 \text{ m}$ bude dosah měření dle rovnice 1.1 $d_{RH} = 3,57 \left(\sqrt{20} + \sqrt{500} \right) = 95,78 \text{ km}$.

1.2.3 Pozemní monitorování

Už v roce 1992 na letišti JFK proběhlo pozemní monitorování, kvůli hlášením o nedetekovaných letadlech s odpovídači módu S systémem TCAS. Monitorování pomocí DATAS odhalilo velké



množství vysílání neplatných nebo zakázaných 24bitových adres. Většina odpovídačů mod S byla naprogramována tak, aby vysílala adresu s nulovými bity. Druhá nejpočetnější skupina neplatných adres měla všechny bity obsazené jedničkami. Bylo velmi pravděpodobné, že se ve vzdušném prostoru kolem letiště nacházela dvě letadla se stejnou adresou. Navíc TCAS na tyto adresy mohl reagovat nepředvídatelně, letadlo vůbec nedetekovat nebo vydat RA pro druhé letadlo se stejnou adresou [12].

Akademici z Tu Delft navrhli měření provozu a rušení na frekvenci 1090 MHz pomocí SDR rádia umístěného v dosahu provozu z letiště v Amsterdamu. Vyhodnocení vzorku dat z měření po 24 hodin, kdy se v každé hodině zaznamenalo 30 sekund dat ze signálu ukazuje, že v průběhu dne, kdy je provozní špička v letovém provozu, může chybovost dekódování signálu ADS-B dosáhnout až 70 %. Jako opatření ke snížení této chybovosti navrhuji snížení počtu dotazů módu A/C a nový návrh protokolu datového spoje ADS-B s lepší odolností vůči rušení [18].

V červenci roku 2020 spustil Eurocontrol síť pozemních stanic na monitorování dotazovačů a odpovídačů (EMIT - European Monitoring of Interrogators and Transponders). Síť má za úkol detekovat a zaznamenávat problémy v pásmu 1030/1090 MHz, poté podávat informace, podporu a nástroje k řešení problémů. Jedním z výsledků byla oprava a modifikace dotazovače v jižním Walesu, který pracoval mimo specifikaci. Nadměrným dotazováním přetěžoval odpovídače v dosahu [19].

1.3 Interference

Interference z definice ITU RR1.166 až RR1.169 je příjem nežádoucí energie radiokomunikačním systémem, který se projevuje jakýmkoliv zhoršením výkonu [1]. Působením interference může dojít ke krátkodobému přerušování nebo zpoždění dat, snížení datového toku a až k úplnému přerušování služby. Interference může být způsobena úmyslně s cílem ochromit systém a způsobit výpadek služby. ITU dělí interferenci na:

- přípustnou interferenci,
- tolerovanou interferenci,
- škodlivou interferenci.

Z pohledu zdroje interference

- vlastní interference,



- interference z vedlejšího kanálu,
- protiprávní rušení.

Protiprávní rušení v případě ADS-B vrstvy není jen zarušení kanálu a zamezení příjmu kterékoliv zprávy, ale zahrnuje i řadu způsobů vysílání podvržených zpráv. Na vrstvě datového protokolu není implementována žádná ochrana a data jsou nešifrovaná. Například injektáž falešné zprávy a vysílání k cílenému přehledovému systému. Uměle vytvořená zpráva může sloužit různým účelům, to zahrnuje vysílání zprávy ze země, z pilotovaného nebo nepilotovaného letadla. Úprava legitimní zprávy kooperujícího cíle překrytím signálu a změnou dat o poloze dojde z pohledu přehledového systému k odklonění trajektorie. Úplné překrytí legitimní zprávy, tak, že ji přehledový systém nevyhodnotí jako platnou ADS-B zprávu [13].

Vzhledem ke sdílení radarových přehledových dat mezi stanovišti poskytovatelů řízení letového provozu ATCO, by takový útok musel být cílen na více dotazovačů a je nepravděpodobný. Vytvoření falešné zprávy je poměrně snadné a SDR vysílače se k tomu hodí, protože jej lze naprogramovat, vytvořit falešné zprávy a podle potřeby je vysílat k cíli.

Dle specifikací Eurocontrol pro evropskou přehledovou Mod S stanici (EMS European Mode S station) nové stanice mód S musí mít systém detekce a hlášení, navíc rušení nesmí poškodit přijmač a musí obnovit funkci do 2 ms od skončení rušení. [10]

Reálnějším problémem frekvencí 1030/1090 MHz je vlastní interference způsobená příliš velkým provozem komunikace na kanálu, především nadměrným dotazováním nad specifikaci odpovídačů. Na tento problém se zaměřuje nařízení komise č. 1207/2011 článek 6 opatření k ochraně spektra. Vlastní interference je způsobená zahlcením kanálu oprávněnými uživateli. Výsledek je, ale stejný jako kdyby šlo o cizí rušení. Snižuje se dostupnost přehledové služby. Obsazení odpovídače způsobí přijatý dotaz se silou signálu nad minimální spouštěcí úroveň (MTL - Minimum Triggering Level), odpovídač vyhodnotí, zda má na dotaz odpovědět. Do času obsazení odpovídače se také počítá čas automaticky spuštěného vysílání odpovědi. Vyjadřuje se v % času poměru obsazeného odpovídače k času kdy je odpovídač dostupný. [4].

Pokud dojde k zahlcení odpovídače nadměrnými dotazy nad specifika minimální provozní výkonnosti, odpovídač reaguje tak, že sníží citlivost přijímače. Tím na dotazy z méně výkonných nebo vzdálenějších systémů není odpovídáno. Specifikace ED-77 / DO-201A udávají parametr, kolik dotazů musí být schopen odpovídač zpracovat.



1.3.1 FRUIT

Chybná indikace cílů z rušení (FRUIT - False Replies Unsynchronised In Time) se objevuje, pokud je odpovídač vystavený více než jednomu paprsku dotazovače. Z pohledu dotazovače jde o odpovědi vyvolané jiným dotazovačem. Odpověď může být přijata ze směru hlavního paprsku nebo postranními laloky. Pokud jsou tyto odpovědi přijaty ve stejný čas jako oprávněné odpovědi na dotaz, zhoršuje se možnost dekódovat odpovědi a některé oprávněné odpovědi nebudou dekódovány. Ke zmírnění tohoto jevu na straně zpracování odpovědí se odpovědi ukládají a jsou porovnávány se signály během další doby opakování pulzu. Situace se zhoršuje s narůstajícím počtem dotazovačů a s rostoucím provozem ve vzdušném prostoru.

1.3.2 Garbling

Garbling se objevuje, když jsou letadla z pohledu radaru blízko sebe (azimut a vzdálenost k radaru) a není možné od sebe odlišit dvě odpovědi. Hlavní dva typy jsou:

- synchronní,
- nesynchronní.

Jako synchronní se projeví, když pulzy odpovědi dvou odpovídačů do sebe zapadnou se shodnou hranou náběhu pulzu a proto odpovědi od sebe není možné rozlišit a vede to k dekódování chybné zprávy. Nesynchronní garble nemá hrany pulzů přímo v zákrytu a odpovědi se dají rozlišit. Garbling se detekuje pomocí obvodu se zpožděním.

1.3.3 Opatření ke snížení interference

ICAO deklaruje aktivity a opatření k podpoře lepšího využití pásma 1030/1090 MHz, souhrnně to zaštiťuje pod názvem ADS-B V3 & Mode S transponder. Naprosto základní a první nástroj k odstranění interference je multilaterální dohoda o koordinaci přidělení frekvencí různým službám, monitorování a ochrana pásma pro letecké navigační služby (ARNS).

Ke zmírňujícím opatřením patří také zavedení hybridního sledování systému ACAS, kdy aktivně posílá dotazy s nižší opakovací frekvencí. Další opatření je, že odpovídače certifikované po 1. lednu 2020 nesmí vysílat odpovědi na všeobecné dotazy módu A/C/S a toto vysílání potlačit, aby se snížilo nežádoucí vysílání v pásmu 1090 MHz [17].



Dále uvádím některá opatření z doporučující publikace Eurocontrolu, která by vedla ke snížení počtu odpovědí [4] jde o soubor doporučení z roku 2020. Snížení maximálního počtu odpovědí na všeobecný dotaz módu S spuštěných dotazovačem ze současné hodnoty 6 podle článku 3.1.2.11.1.1.2 předpisu L10/IV [17] na 3. Dále také dotazovače krátkého dosahu, například méně než 100 NM by mohly provádět zachycení ICAO adresy letadla pro adresný dotaz pomocí ADS-B a ne ze všeobecného dotazu. Snížit vysílací výkon zejména u dotazovačů krátkého dosahu. Shlukováním pozemních dotazovačů do koordinovaných sítí, pro snížení počtu adresných dotazů i odpovědí.

1.4 SDR přijímače

Analogový signál lze převést na diskrétní signál pomocí vzorkování. Vzorkování je zaznamenávání kontinuálního analogového signálu v konstantní definované časové rozestupy. To se děje prostřednictvím převodníku analogových signálů na číslicové hodnoty ADC (Analog Digital Converter). Počet vzorků za sekundu se nazývá vzorkovací frekvence f_s a udává se v hertzech (Hz) případně v sps (samples per second). SDR digitalizuje rádiový signál zvolené frekvence a posílá ho přes USB nebo ethernet rozhraní do počítače. Veškeré zpracování signálu, filtrování, posunutí frekvence, převzorkování, demodulace, se poté děje pouze digitálně. Pokud je vzorkovací frekvence $f_s = 4 \text{ MHz}$, ADC vzorkuje signál vzorkovací periodou $T_s = 0,25 \mu\text{s}$ 1.2, to znamená zapsání okamžité analogové hodnoty a převedení do digitální hodnoty každých $0,25 \mu\text{s}$.

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (1.2)$$

Minimální vzorkovací frekvence musí být podle Nyquist–Shannonova vzorkovacího teorému 1.3 dvakrát větší než frekvence modulačního signálu . Kde B je šířka pásma, tj. maximální frekvence, kterou signál zájmu obsahuje. Vzorkováním se v podstatě odfiltrují frekvence vyšší než polovina vzorkovací frekvence. Přesnost zaznamenání analogové hodnoty závisí na rozlišení ADC převodníku udávané v bitech.

$$f_s > 2B \quad (1.3)$$



Komponenty, které byly tradičně v komunikačním systému rádia realizované pomocí analogových obvodů, lze nyní díky pokroku v počítačové technice realizovat čistě softwarově. Podle míry integrace softwaru v rádiu rozděluje publikace SDR4engineers [7] :

- softwarově řízené rádio,
- softwarově definované rádio.

V softwarově řízeném rádiu stále provádí zpracování signálu jako filtrování a demodulaci analogové obvody. Softwarem se přepíná například mezi kanálovou roztečí 8,33 kHz a 25 kHz, modulací AM a FM nebo vysílacím výkonem.

V softwarově definovaném rádiu jsou některé nebo všechny funkce zpracování signálu definované softwarem a používá se aplikace číslicového zpracování signálu (DSP - Digital Signal Processing) signál je filtrován, demodulován a dekódován digitálně.

Například pro hlasovou komunikaci lze jedním přijímačem - vysílačem pokrýt široké pásmo frekvencí, které by běžné rádio nebylo schopno realizovat. Koncová vysílací část je samozřejmě stále pouze jedna a tím pádem přizpůsobena pouze na úzké spektrum frekvencí. Tento problém lze řešit pomocí laditelných antén a nebo přepínáním koncové vysílací části soustavou koaxiálních relé.

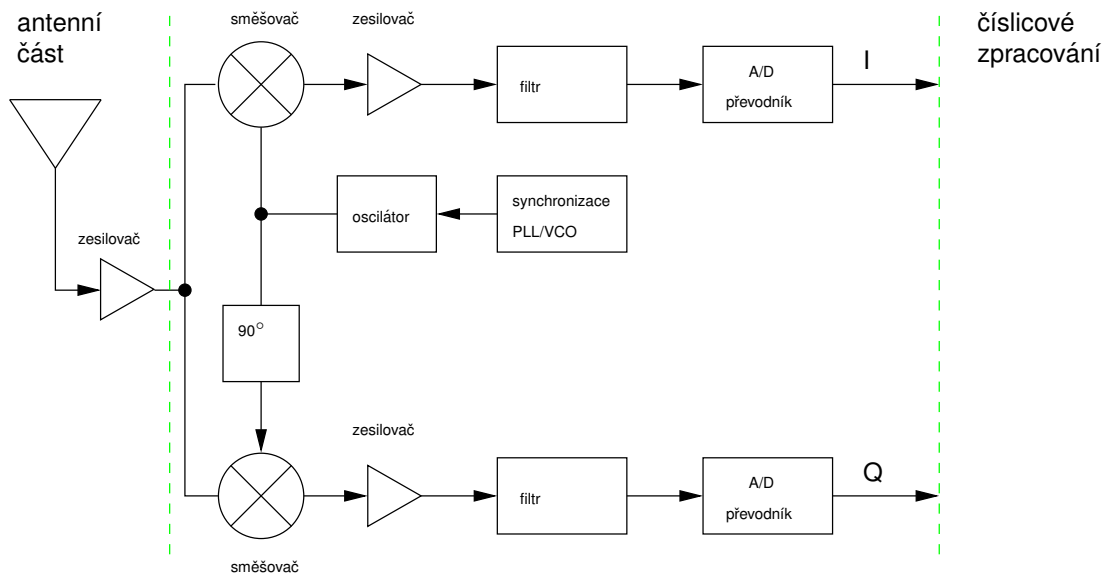
SDR přijímače digitalizují radiový signál a výsledkem jsou vzorky ve fázi Inphase $I(t)$ a fázově posunuté o 90° Quadrature $Q(t)$, signál je popsán rovnicí 1.4. SDR používají architekturu přijímačů s nulovou mezifrekvencí nazývanou také přímospěšující přijímač. Na obrázku 1.4 je blokové schéma typického přijímače s nulovou mezifrekvencí. Oscilátor se ladí na nosnou frekvenci přijímaného signálu nebo na frekvenci blízkou nosné pro odstranění stejnosměrného píku způsobeného převodem signálu na nulovou frekvenci [24].

$$IQ(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi) - jQ(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (1.4)$$

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (1.5)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{Q}{I} \quad (1.6)$$

Dynamický rozsah je podle rovnice 1.9 kde N je rozlišení ADC převodníku v bitech. Maximální odchylku nosné laděné frekvence popisuje rovnice 1.7. Odstup signálu od šumu (SNR Signal-to-Noise



Obrázek 1.4: SDR přijímač

Ratio) určuje rozlišení ADC podle rovnice 1.8. Kapacitu pásma C vyjadřuje rovnice 1.9, šířku pásma B je rovna vzorkovací frekvenci f_s 1.10 [28].

$$f_{o,max} = \frac{f_c \cdot PPM}{10^6} \quad (1.7)$$

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} 2^N \right) = 6,02N + 1,76 \quad (1.8)$$

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (1.9)$$

$$B = f_s \quad (1.10)$$

Spousta SDR přijímačů pro amatérské využití má také výstup pro vysílání (někdy i více kanálů). Většinou se jedná pouze o výkony v řádu mW, pro prototypovací a výukové účely. Dekódování a zpracování signálu je obecně provedeno počítačem, který lze poměrně jednoduše přeprogramovat nebo nahrát nový software a tím zavést nový protokol pouze použitím nového softwaru. Aplikace konceptu SDR se začala šířit po roce 2002, kdy Gerald Youngblood vydal sérii článků "A Software Defined Radio for The Masses" [29].



V tabulce 1.1 uvádím některé SDR přijímače, které vyhovují rozměry i parametry pro účely měření signálů vzestupného/ sestupného spoje 1030/1090 MHz. Detaily o Pluto SDR s dostatečnou vzorkovací frekvencí i pro případné dekódování vzestupného spoje uvádím v kapitole 2.1.3. Detaily rozšířeného RTL-SDR uvádím v kapitole 2.1.4. USRP E310 je založený na identickém čipu AD9361 jako Pluto SDR, ale Pluto je (SISO - Single Input Single Output) jeden kanál pro příjem jeden kanál pro vysílání. E310 je (MIMO - Multiple Input Multiple Output) konkrétně 2x příjem a 2x vysílání.

Tabulka 1.1: Přehled některých SDR přijímačů a jejich parametrů

	RTL-SDR V3	Pluto SDR	LIME-SDR	USRP E310
Rozsah frekvencí (MHz)	25 - 1750	325 - 6000	0,1 - 8800	70 - 6000
f_s max (MSPS)	2,56	61,44	61,44	61,44
Rozlišení ADC (bit)	8	12	12	12
Dynamický rozsah (dB)	50	74	74	74
Šířka pásma (MHz)	4	61,44	61,44	56
Chyba oscilátoru (ppm)	$\pm 0,5-25$ ¹	± 25	$\pm 1-4$	$\pm 2,0$ ²
$f_{o,max}$ (kHz) při 1030 MHz	$\pm 0,515-25,75$	$\pm 25,75$	$\pm 1,03-4,12$	$\pm 2,06$
Konektor	SMA	SMA	U.FL	SMB
Rozhraní	USB 2.0	USB 2.0	USB 3.0	Ethernet

¹ TCXO teplotní stabilizace

² Externí časová synchronizace

1.4.1 Použití SDR ve sledování leteckého provozu

Pro dekódování ADS-B vysílání pomocí SDR je napsáno velké množství programů. Zde je uveden výčet dekodérů, které jsem v průběhu diplomové práce instaloval a zkoušel.

- RTL1090,
- dump1090,
- pyModes,



- Matlab airplane tracking,
- rtl_adsb.

Funguje i mnoho sítí SDR přijímačů například FlightAware, Airspy, Flightradar24, ADSB CZ, OpenSky Network, které sdružují dekodované zprávy z SDR a sdílejí je na webových stránkách, některé jsou komerčně založené avšak aktuální data jsou většinou přístupná zadarmo. OpenSky Network je otevřená síť přijímačů sbírající a archivující data do databáze pro výzkumné účely. Většina sítí je otevřená a každý se může zapojit a rozšířit nebo zlepšit pokrytí sítě tím, že přidá svůj přijímač, který bude posílat dekodované zprávy do sítě.

Pro dekodování opačného toku zpráv, tedy dotazů z pozemních dotazovačů kromě těch komerčních mnoho není. Nástroje, které se dají použít a jsou dostupné jako open source nebo v obecné veřejné licenci jsou uvedeny v následujícím výčtu.

- dump1030,
- pyModes,
- Opensky modes-uplink-decoder.

Program dump1030 požaduje k běhu operační systém linux. Program dump1030 demoduluje a dekoduje nezpracovaná data z SDR. Jsou dvě možnosti vstupu vzorků z SDR, první možností je živý vstup dat přímo z RTL-SDR, druhý způsob je zadání vstupního souboru se zaznamenanými daty z SDR. Druhou možnost používám v této diplomové práci, tedy zaznamenaný soubor ze záznamu slouží jako vstup programu dump1030 výstupem jsou počty dotazů. Podrobný popis programu a jeho použití pro vyhodnocení je v kapitole 2.2.3.

Během práce na diplomové práci jsem narazil na další aplikace SDR přijímačů v leteckém průmyslu. Konkrétně jsou to rádia pro VHF/UHF hlasovou komunikaci Komunikační rádia naplno rozvíjejí výhody konceptu SDR: mají schopnost vysílat/ přijímat v širokém pásmu, umožňují používat široké spektrum komunikačních protokolů a jejich implementace je aplikována výhradně softwarově. Má to výhody například v brzkém nasazení hardwaru, postupného nasazování, ladění softwaru a dodatečného přidávání funkcí.



1.5 Sekundární přehledový radar

Mód A SSR zajišťuje identifikaci letadel čtyřmi čísly oktalového kódu. Tím je dostupných 4096 možných kombinací kódu. 4 místný oktalový kód nazývaný squawk, údajně výraz squawk pochází z první aplikace identifikace vlastní cizí (IFF - Identification Friend or Foe) z anglie. Systém se jmenoval parrot a pokyn na komunikační frekvenci zněl squawk your parrot.

Mód C zavádí kódovanou barometrickou výšku pomocí pulzů. Nejdříve byla barometrická výška s rozlišením 100 ft. Dnes je požadována výška s rozlišením 25 ft.

Mód S (select) je rozšíření klasického radarového systému (ATCRBS) o adresné dotazování letadel v dosahu dotazovače vybavených mód S odpovídači. Každé letadlo vybavené odpovídačem mód S má přidělenou 24 bitovou ICAO adresu. Pozemní dotazovač má funkci zachytit letadlo a poté selektivně dotazovat pomocí ICAO 24 bitové adresy. Toto výrazně zlepšuje schopnost radaru zachytit a sledovat cíle. Data se vysílají Pulzně polohovou modulací (PPM), kdy vysílání pulzu v první polovině intervalu bitových pozic znamená binární jedničku a vysílání pulzu v druhé polovině 0,5 μ s bitového intervalu znamená binární nulu. Aplikace módu S do ATC snížila problémy s interferencí způsobenou FRUIT a GARBLE snížením počtu odpovědí uzamčených odpovídačů pro adresné dotazování.

Klíčové vlastnosti módu S:

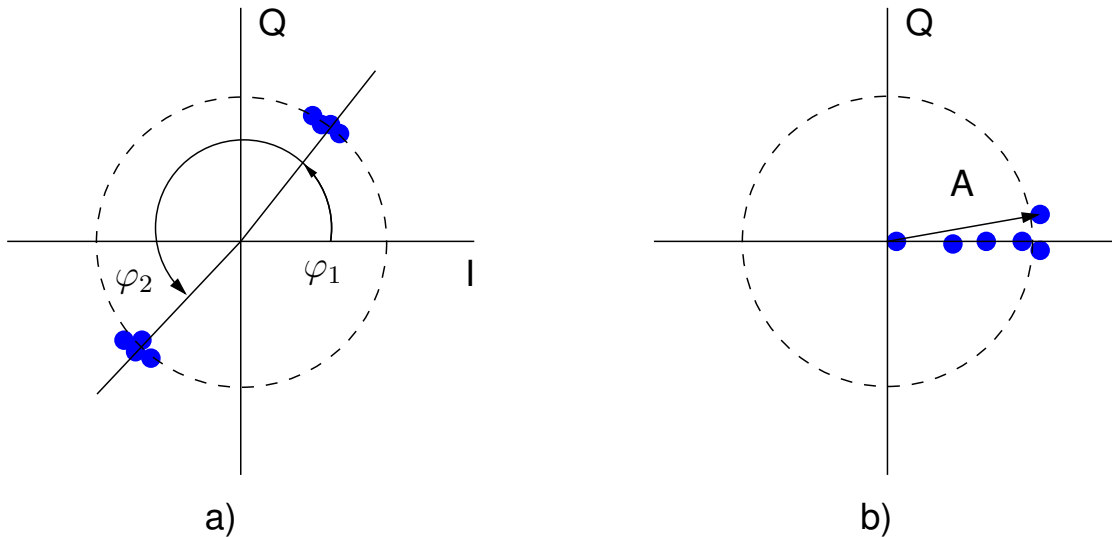
- selektivní dotazování,
- individuální letadlové adresy,
- možnost datalinku.

ADS-B automatické závislé vysílání přehledových dat je od roku 2020 klíčový prvek infrastruktury pro řízení letového provozu. ADS-B musejí být vybavena letadla nad hmotnost 5700 kg. Není výjimkou i dobrovolná instalace při modernizaci avioniky letadla.

1.5.1 1030 MHz

Frekvenci 1030 MHz sdílí dotazy pozemních přehledových systémů a dotazy ACAS okolních letadel. Vzestupný spoj je modulován diferenciální fázovou modulací (DPSK - Differential Phase Shift Keying). Pro dekódování DPSK není nutná synchronizace fáze. Díky referenční změně fáze viz obrázek 1.7 a)

1,25 μs po náběhu pulzu P6 stačí vyhodnocovat následné čipy v porovnání s touto referencí. Konstelční diagram nesynchronizované fázové modulace je na obrázku 1.5 b), vyhodnocuje se pouze rozdíl φ_1 a φ_2 , protože jsou dotazy modulovány diferencially a nevyhodnocuji, jestli je signál ve fázi nebo v protifázi, ale jen změny fáze o $180 \pm 5^\circ$ podle rovnice 1.6.

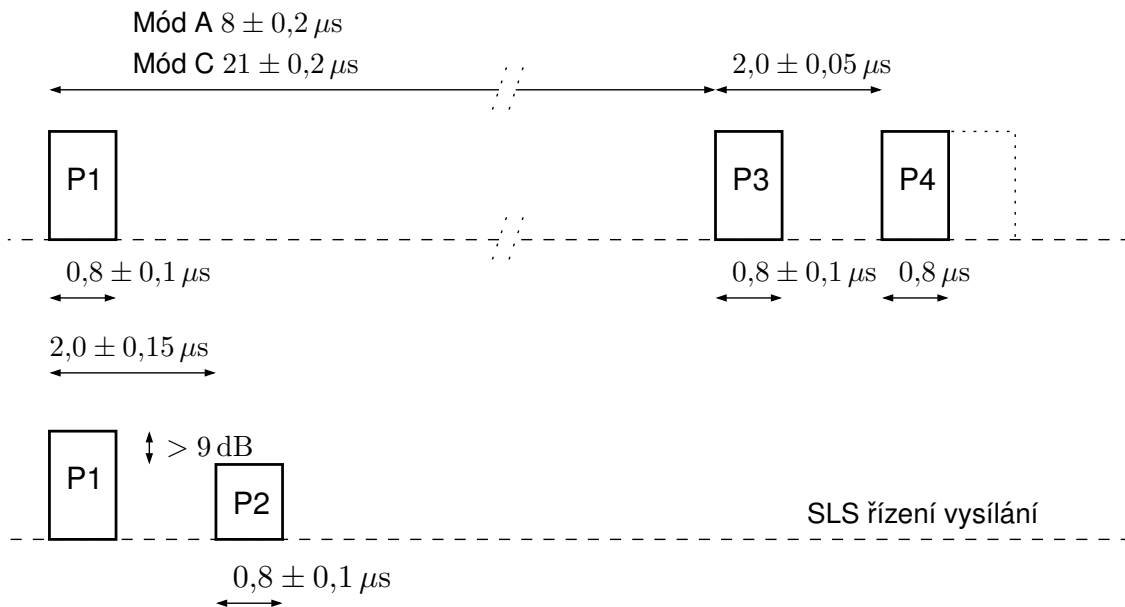


Obrázek 1.5: Konstelční diagram a) DPSK b) PPM

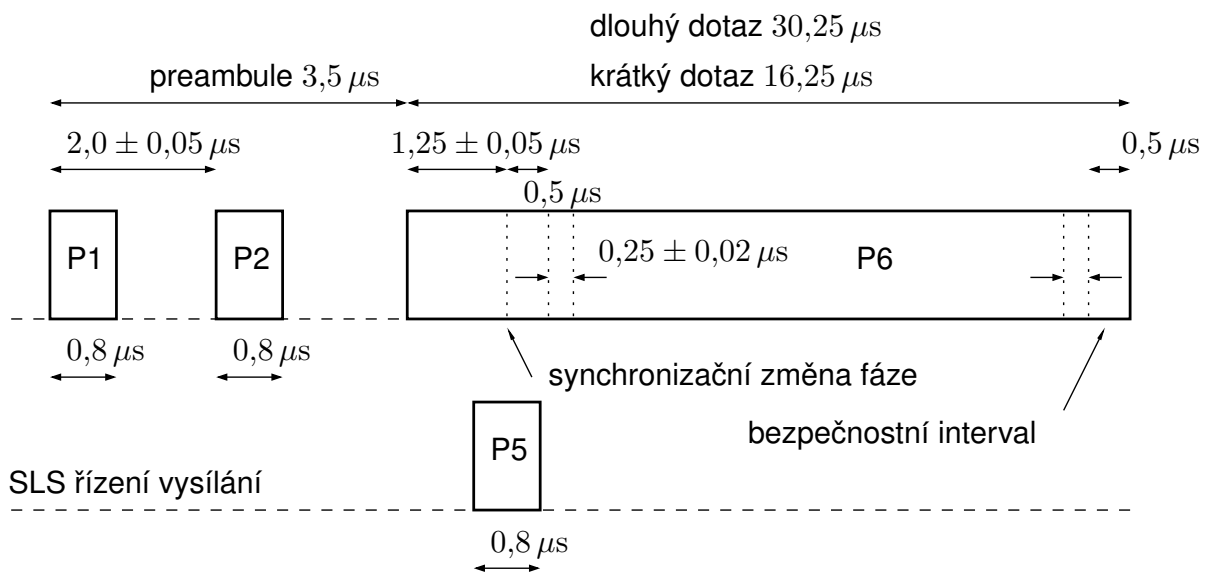
Modulovaný signál vzestupného spoje používá převrácení fáze pro binární hodnotu 1 a pokud se fáze nemění znamená hodnotu 0. Rychlosti přenosů vzestupného a sestupného spoje jsou uvedeny v tabulce 1.2.

Tabulka 1.2: Vzestupný spoj, sestupný spoj 1030/1090 MHz

	Přenosová rychlost (Mbit/s)	Modulace	Frekvence nosné vlny (MHz)
uplink (vzestupný spoj)	4	DPSK	1030
downlink (sestupný spoj)	1	PPM	1090



Obrázek 1.6: Dotaz Múd A a C [17]



Obrázek 1.7: Dotaz Múd S [17]

1.5.2 1090 MHz

Na dotazy odpovídá sekundárního přehledového radaru odpovídá na nosné frekvenci 1090 ± 3 MHz. Pro dekódování ADS-B zpráv 1090ES stačí vzorkovací frekvence 2 Msps. Múd S downlink je kódovaný



s periodou pulsů $0,5 \mu\text{s}$. Tomu vyhoví nejrozšířenější typ RTL-SDR, občas se udává maximální vzorkovací frekvence až 3,2 Msps, ale stabilní vzorkovací frekvence jsou kolem 2,5 - 2,6 Msps.

U PPM oproti DPSK nezáleží na fázi a vyhodnocuje se pouze zda je signál v dostatečné úrovni v místě datového symbolu a nebo není. V pythonu s balíčkem numpy je amplituda podle rovnice 1.5:

```
numpy.abs(IQ)
```

Takto vyhodnocuje signál většina open softwaru dekóující ADS-B. Používá to i program dump1030, samozřejmě v ekvivalentní funkci C++. Takto vyhodnotí amplitudu a poté pořadí pulzů a časový odstup dotazu a přiřadí příslušný formát dotazu. Na obrázku 1.6 jsou uvedeny časové odstupy pulzů módů A a C.

Fáze signálu se získá podle rovnice 1.6 funkcí v pythonu:

```
numpy.angle(IQ) v radiánech případně numpy.angle(IQ, deg=True)
```

1.6 Limitace současného stavu

Pokud je záznam prováděn na zemi, analýza a výsledky jsou limitovány umístěním záznamového zařízení. V místě záznamu nemusí být v dosahu významný počet pozemních dotazovačů. Není možné zjistit počet dotazů přijatých odpovídačem v letadle, které nespustí odpověď, tudíž není možné přesně spočítat obsazenost odpovídače a provést ověření, zda se odpovídače nepřetěžují nadměrným dotazováním. Proto pozemní měření není doporučeno k prokázání shody se článkem 6(1) SPI IR nařízení komise 1207/2011 [4].

Limitace pozemního monitorování frekvence 1090 MHz je obzvláště v prostorech s hustým letovým provozem při použití všesměrové antény u přijmače budou pravděpodobně vyhodnoceny pouze odpovědi přijaté s nejvyšší silou signálu. Ostatní odpovědi budou překryty. Tím pádem ne všechny odpovědi z konkrétního letadla budou vyhodnoceny a data pro analýzu budou nepřesná. Z pohledu frekvence dotazovače 1030 MHz je hlavní limitace v umístění záznamového zařízení, které musí být v přímé viditelnosti datozovače a tak nepokryje příliš velkou oblast. Není možné zjistit počet dotazů přijatých odpovídačem, které nespustí odpověď, takže není možné vypočítat obsazenost odpovídače [4].

Limitace pro měření vzestupného spoje na frekvenci 1030 MHz je nedostatek softwaru pro SDR přijímače s vyšší vzorkovací frekvencí umožňující demodulovat a dekódovat zprávy vzestupného spoje.



Příjem a dekódování ADS-B je mnohem lépe zavedeno a má větší podporu programů na obě hlavní platformy windows i linux.

V této diplomové práci jde o pasivní měření, to znamená, že se nevysílají žádné dotazy ani odpovědi a jen se zaznamenává příchozí signál. To znamená, že v rámci pasivního měření lze ověřit omezený počet parametrů systému SSR.



2 Metodika řešení

Cíl je sestavit zařízení se kterým zaznamenám data pomocí běžně dostupných levných komponentů. Vyhodnocení poté proběhne offline na jakémkoliv počítači s operačním systémem linux a nainstalovanými příslušnými knihovny pro python. Další požadavek je nainstalovaný program dump1030 a vlastní skripty a programy z přílohy této práce viz příloha.

2.1 Záznamové zařízení (hardware)

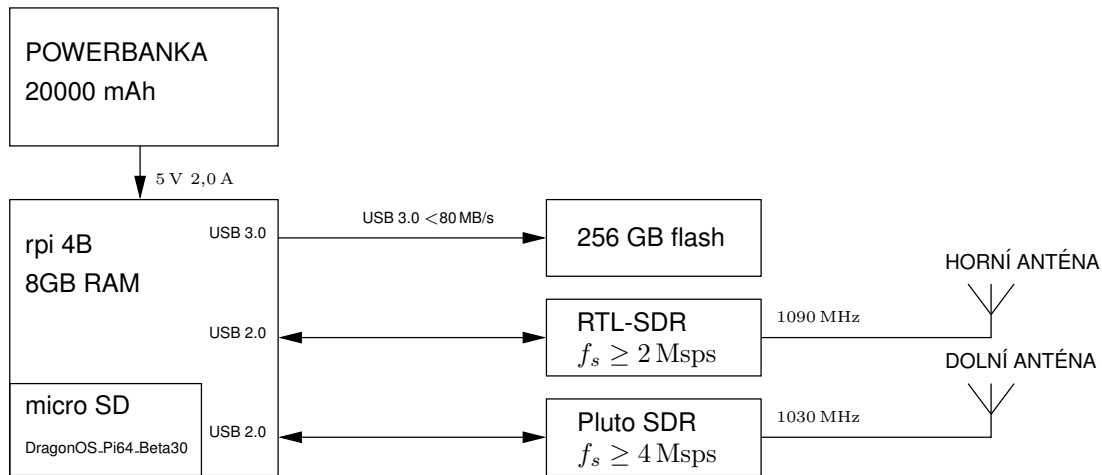
Hlavní hardware komponenty jsou jednodeskový počítač, karta s OS micro sD nebo eMMC, přijímač SDR RTL-SDR, Pluto SDR, antény pro příjem, flash disk a powerbanka.

2.1.1 Raspberry

Jako záznamové zařízení pro zápis dat jsem vybral jednodeskový počítač raspberry pi4B s 8 GB RAM. Jednodeskový počítač zároveň sloužil jako host, kde běžel záznamový skript pro SDR. Operační systém běží z micro SD karty, pro rpi 4B je dostupná široká škála operačních systémů, od těch pro všeobecné použití jako Raspberry Pi OS, Apertis a RISC OS Pi, přes řadu specificky zaměřených na konkrétní účel. Jeden z nich je i SIGINT OS (SIGINT Signal Intelligence) - založený na Ubuntu. v SIGINT OS je předinstalovaná řada ovladačů a programů pro podporu SDR, konkrétně Hack-RF, BladeRF, USRP, RTL-SDR. Tím se lze vyhnout problémům s instalací ovladačů a knihoven pro hardware, ale Pluto SDR na seznamu není.

Pro mojí aplikaci jsem vybral DragonOS.Pi64.Beta30 založený na Ubuntu 22.04 LTS, protože má nejlepší podporu GNU radio verze 3.10. Operační systém Ubuntu 22.04 LTS mám i na přenosném počítači. Výhodou shodných systémů je snadnější kontrola verzí knihoven a udržení vzájemné kompatibility programů z jednoho zařízení na druhé. Platí to především pro GNU radio, jehož grafy a funkční bloky nejsou zpětně kompatibilní se staršími verzemi.

Pro záznam dat se nabízí dvě řešení: zápis na microSD kartu nebo externí disk. Výrobce uvádí ve specifikacích k produktu rpi4B přenosovou rychlost zápisu a čtení na microSD kartu 50 MB/s, tato hodnota není dostatečná a proto microSD karta není vhodná pro použití k zápisu dat z SDR. Ideální by bylo SD kartu úplně obejít a použít SSD disk pro spuštění systému i pro ukládání dat. To ještě není u rpi standardně dostupné i když i to lze obejít. Pro výše uvedené jsem zvolil zápis na 256 GB flash



Obrázek 2.1: Blokové schéma sestavy

disk samsung bar USB 3.1 udávaná rychlost zápisu až 300 MB/s. Naměřená hodnota rychlosti zápisu pomocí benchmarku v GNOME Disks je 81 MB/s.

Předtím, než jsem se pustil k nasazení řešení záznamu na rpi 4, jsem ověřoval koncept na svém přenosném počítači acer (VN7-591G-51CY) Intel Core i5 4210H Haswell Frekvence procesoru 2,9 GHz, 3x USB 3.0 teoreticky až 5 Gb/s. To mi dovolilo testovat stejné rozložení jako u rpi, hlavně zápis dat na usb flash disk. Librtlsdr umožňuje číst nezpracované vzorky z RTL-SDR a ukládat je do souboru [27]. Příkaz na zápis s laděnou frekvencí 1030 MHz a vzorkovací frekvencí 2,5 Msps je uveden níže.

```
$ rtl_sdr -f 1030000000 -s 2500000 ''jméno_souboru''.iq
```

Takto zaznamenaný soubor můžeme vyzkoušet na vstupu do programu dump1030. Vzorky se zaznamenávají přímo v osmibitových číslech uint8 to znamená velmi nízký tok dat 5 MB/s. pro instalaci na linuxu dump1030:

```
$ git clone https://github.com/Fuziih /dump1030.git
```

```
$ cd dump1030
```

```
$ cd dump1030
```

```
$ make
```

```
$ cd dump1030
```



2.1.2 Napájení

Oficiální zdroj od rpi poskytuje 5,1 V - 3,0 A tj. 15,3 W. Nicméně podle mého měření s připojenými periferiemi, myš, klávesnice, monitor a zátěží záznamu z obou SDR. Byl odběr 2 A to je 10,2 W. Na 30 minut letu by stačil zdroj, o kapacitě 5 Wh.

Kapacitu powerbanky použitou pro měření jsem ověřil napájením rpi na kterém běžela těžba kryptoměny. Tímto jsem zjistil, že rpi je velice citlivé na napájení a vyžaduje minimálně 4,85 V. Když napětí kleslo pod hodnotu 4,85 V byl v logu zapsán event `low volt`. Napětí nebylo dostatečné a způsobilo snížení výkonu procesoru. To se projevilo ve výkonu těžení a miner hlásil rychlost 62 H/s. Aby se snížil nárok na napájení deaktivoval jsem HDMI port.

```
xrandr ----output HDMI-1 ----off
```

Dále jsem vypnul indikační diody aktivity a napájení.

Do souboru `/boot/config.txt` se zapíše:

```
# Turn off Power LED
dtparam=pwr_led_trigger=default-on
dtparam=pwr_led_activelow=off
# Turn off Activity LED
dtparam=act_led_trigger=none
dtparam=act_led_activelow=off
# Turn off Ethernet ACT LED
dtparam=eth_led0=14
# Turn off Ethernet LNK LED
dtparam=eth_led1=14
```

Poté již nebyla v logu hláška o nedostatečném napájení a miner ukazoval rychlost 92 H/s, obvyklou hodnotu při napájení rpi4 z oficiálního zdroje výrobce. Podle údajů výrobce by mělo stačit 4,75 V. Měření ukázalo, že už při poklesu napětí na 4,85 V, hlásí rpi nedostatečné napájení. Je velmi důležité zvolit vhodný zdroj napájení a také napájecí kabel.



2.1.3 Pluto SDR

Pluto SDR je v podstatě výukový hardware od firmy Analog devices, jež má bohatou historii ve vývoji a výrobě A/D převodníků pro průmyslové použití. Pluto SDR má čip AD9316, ten má rozsah frekvencí 100 kHz až 3 GHz, ale čip AD9316 dokáže ladit frekvence až do 6 GHz. Stačí v ovladači změnit nastavení. Tato možnost je i pro rozhraní přes python. Z jedné strany přístroje jsou dva koaxiální konektory pro připojení antén 1x pro vysílání a 1x pro příjem. Na druhé straně je micro USB pro samostatný vstup napájení a ještě druhý micro USB 2 OTG s maximální přenosovou rychlostí 60 MB/s.

Narozdíl od RTL-SDR má Pluto SDR svůj processor, je to jednojádrový ARM Cortex 667 MHz a programovatelná hradlová pole (FPGA - Field Programmable Gate Array). Lze napsat aplikaci v programovacích jazycích rodiny C, program umístit na USB disk, Pluto SDR napájet z napájecího konektoru a aplikace automaticky poběží. Aplikace na USB disku musí být buď ve verzi shell skriptu, kde jméno souboru musí být ve formátu `'runme[0-9].sh'` nebo binární soubor s názvem ve stejném formátu `'runme[0-9]'` [11].

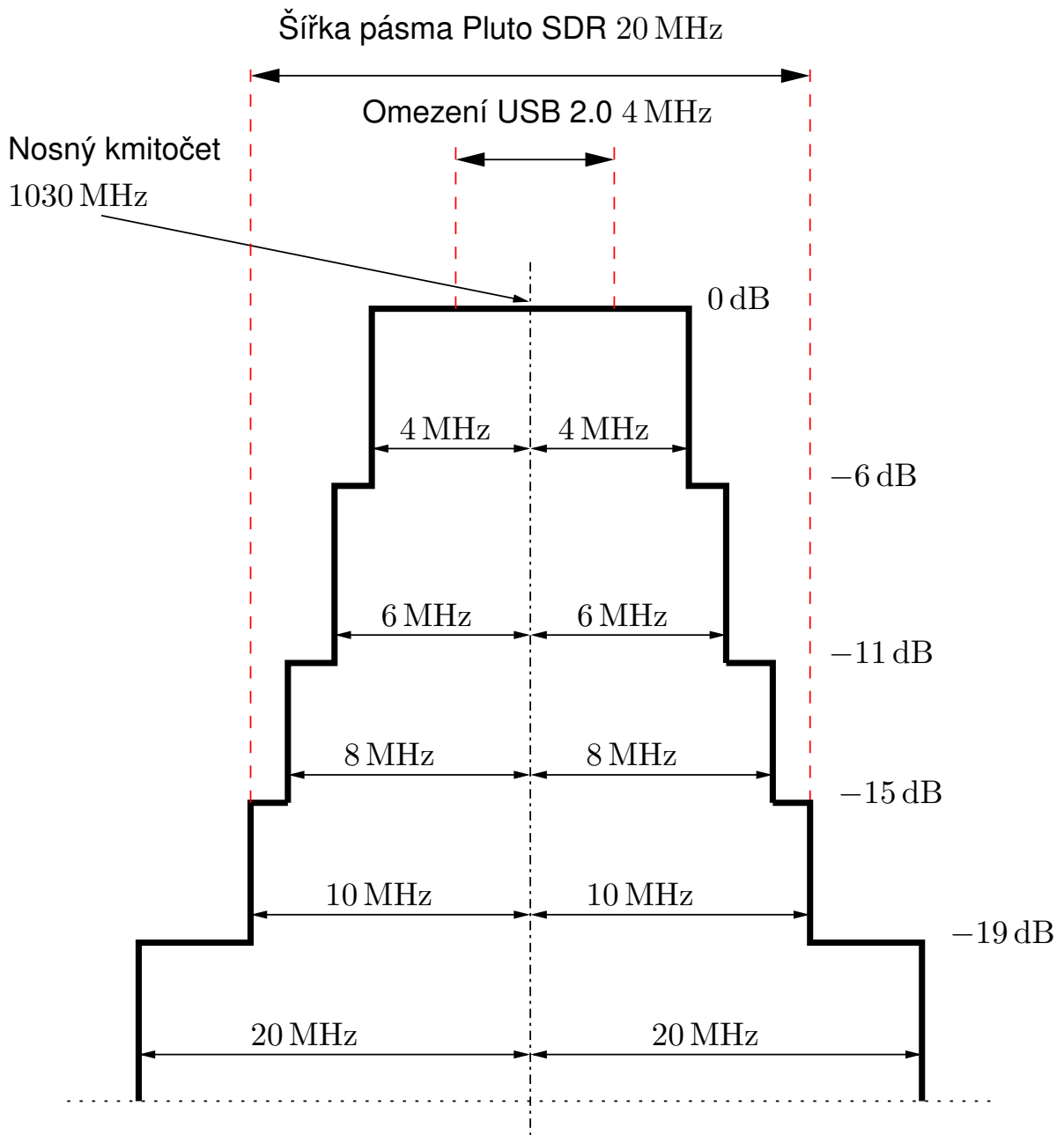
Na obrázku 2.2 limit spektra signálu dotazovače na který musejí odpovídače reagovat, spolu s vyznačenou šířkou přijímaného pásma Pluto SDR, při použití vyššího programovacího jazyka klientské aplikace z počítače, Pluto SDR umožňuje šířku pásma až 20 MHz, ale muselo by docházet k digitálnímu zpracování signálu DSP na programovatelném hradlovém poli uvnitř Pluto SDR.

Na obrázku 2.3 vlevo je blokové schéma ladícího čipu a processoru v Pluto SDR na obrázku vpravo jsou znázorněny výše popsané možnosti ovládání Pluto SDR. V případě této diplomové práce jde o klientskou aplikaci na linuxu. Klient může být GNU radio, Matlab, program napsaný v jazyce C nebo skript v pythonu.

2.1.4 RTL-SDR

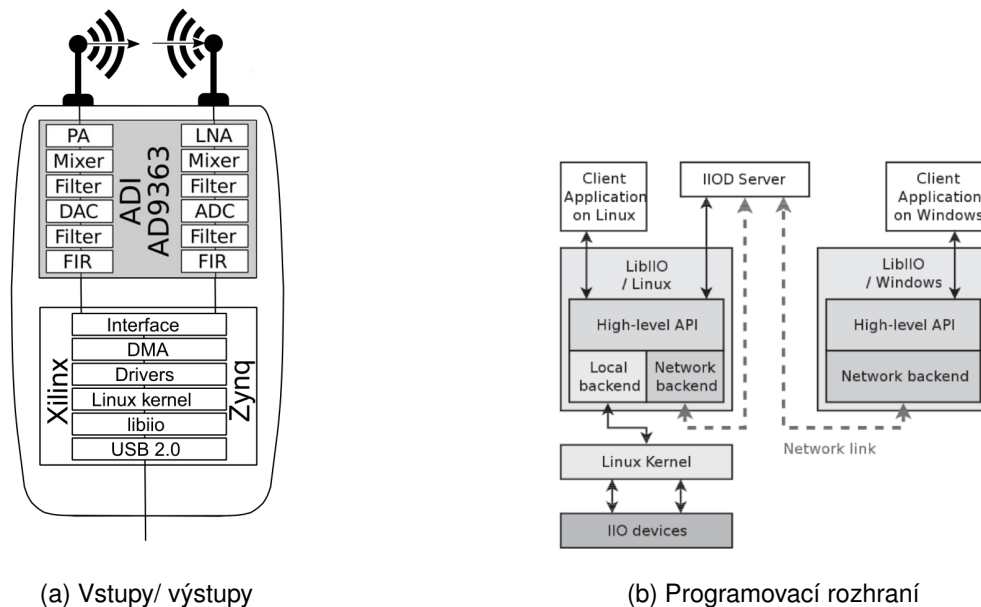
Tato USB klíčenka používá čip R820T2, který původně byl vyvinut jako DVB-T tuner pro příjem televizního signálu. Dnes je na trhu nespočet SDR přijímačů založených na čipu R820T2. Můžeme se také setkat s novým označením R860T, přičemž oba čipy jsou identické. Přijímače RTL-SDR Blog V.3 mají nejlepší vlastnosti z důvodu odvodu tepla přes teplovodivé pásky do kovového pouzdra. Kovové pouzdro poskytuje i stínění před rušením z okolí.

FlightAware vyrobilo konkrétně pro příjem ADS-B zpráv jednoúčelové zařízení, ve kterém je vestavěná dolní propust a nízkošumový zesilovač (LNA - Low Noise Amplifier) naladěný pro frekvenci



Obrázek 2.2: Limity vyzařování pro dotazovač [17]

1090 MHz. A je hojně používaný pro síť k dekódování ADS-B. Instalaci zvládne každý běžný uživatel PC a internetu. K dispozici jsou návody, které provedou zájemce o zapojení do sítě od nákupu SDR přes instalaci softwaru pro dekódování zpráv a odesílání přes TCP/IP do sdružené sítě.



Obrázek 2.3: Pluto SDR [11]

2.1.5 Anténní část

Jako anténa pro frekvence 1030/1090 MHz se na letadlech používá 1/2 vlnný monopól. Délka vlny 1090 MHz je 27,5 cm a nebo běžnější ve všeobecném letectví typ používaný je 1/4 vlnný monopól ploutev na ULL letadlech CI-101, CI 100-3 a AV-22. Spodní anténu pro příjem signálu z dotazovačů, jsem vybral anténu TED104-12 zejména pro vhodnost instalace do zamýšlené sestavy. Spousta dodavatelů nabízí antény pro příjem ADS-B signálu z letadel pro sledování okolního letového provozu. Já jsem vybral pro měření signálu na 1090 MHz anténu označenou jako 3 dBi ADS-B 1090 MHz SMA. Jedná se o anténu s magnetickou základnou, má nízkou hmotnost a přijatelné vlastosti, mírnou nevýhodou je již nainstalovaný kabel RG174 o délce 3 m s SMA konektorem. I když je kabel příliš dlouhý zachoval jsem ho. Nominální útlum při frekvenci 1000 MHz je 0,92 dB/m. Parametry obou antén uvádím v tabulce 2.1

2.2 Záznamový skript (software)

Záznam dat jsem prováděl pomocí programu rtl_sdr jde o program s rozhraním pro příkazový řádek a : \$ rtl_sdr -f 1030000000 -s 2500000 ''jméno_souboru''.iq V průběhu práce jsem se snažil napsat v programovacím jazyku python záznamový skript, výsledkem toho je skript



Tabulka 2.1: Parametry použitých antén

	Horní anténa	Dolní anténa
Maximální výkon	50 W	1,0 kW
Impedance	50 Ω	50 Ω
Polarizace	Vertikální	Vertikální
Zisk	3 dBi	-
Délka	170 mm	62 mm
SWR 1030/1090	-	2 : 1 / 1,2 : 1
Konektor	SMA zástrčka	BNC zásuvka
Výrobce	The Pi Hut/china	TED mfg

data_capture_pluto.py v němž se postupně načtou vzorky a poté se zapisují na disk. Vzniká tak nedefinovaná mezera, kdy se vzorky zapisují a nové se nenačítají. Je to nejprimitivnější způsob zápisu dat. Program GNU radio jsem použil k tvorbě záznamových grafů s blokem zdroje SDR přijímače a s bloky zápisu signálu do souboru.

2.2.1 GNU radio

GNU radio je open-source software s grafickým prostředím pro vývoj a testování komunikačních schémat, kódování a dekódování signálů. Podobně jako v simulinku se pracuje s bloky, které představují nějakou operaci se signálem, často lze měnit jeden nebo více parametrů unitř bloku. Bloky lze také hierarchicky řadit do vyšších funkčních celků. GNU radio verze 3.10 podporuje Pluto SDR a otevřený standard SigMF v minimální specifikaci pro zápis datového souboru a souboru metadat.

Instalace ovladačů, knihoven a softwaru do přenosného počítače na shodné verzi s DragonOS_Pi64_Beta

```
$ sudo apt update
$ sudo dpkg --configure -a
$ sudo apt upgrade
$ sudo install iio utils librtlsdr-dev
```




Přidání gnuradio do repozitáře a instalace:

```
$ sudo add-apt-repository ppa:gnuradio/gnuradio-releases
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install gnuradio
```

Instaluje se verze 3.10.5.1, která už podporuje Pluto SDR.

```
$ sudo apt-get install rapidjson-dev swig libuhd-dev cmake
$ sudo apt-get install git
```

instalace podpory rtl-sdr pro Gnu radio

```
$ git clone git://git.osmocom.org/gr-osmosdr
$ cd gr-osmosdr
$ mkdir build
$ cd build
$ cmake ../
$ make
$ sudo make install
$ sudo ldconfig
$ sudo add-apt-repository -y ppa:pothosware/framework
$ sudo add-apt-repository -y ppa:pothosware/support
$ sudo apt-get install libx11-dev
$ volk_profile
```

Po instalaci a spuštění lze spustit grafické prostředí pro vytváření grafů pro digitální zpracování signálů DSP. GNU radio podporuje programovací jazyk python a je možné vytvářet vlastní uživatelské bloky na zpracování signálu. Uživatelské bloky většinou nejsou přenositelné do novějších verzí a obecně grafy bloků nejsou zpětně kompatibilní. Mimo vlastních bloků lze i vkládat kratší výstřižky kódu v pythonu, toho jsem využil k pojmenování zaznamenaných souborů, použil jsem následující kód:

```
def file_count(file_time):
    if not os.path.exists(f'{file_time}_log.txt'):
```



```
with open(f'{file_time}_log.txt', 'w') as f:
    f.write('0')
with open(f'{file_time}_log.txt', 'r') as f:
    log_number = int(f.read())
else:
    with open(f'{file_time}_log.txt', 'r') as f:
        log_number = int(f.read())
    with open(f'{file_time}_log.txt', 'w') as f:
        new_log_number = log_number + 1
        f.write(str(new_log_number))
return log_number
```

Datum v iso 8601 formátu se získá pomocí:

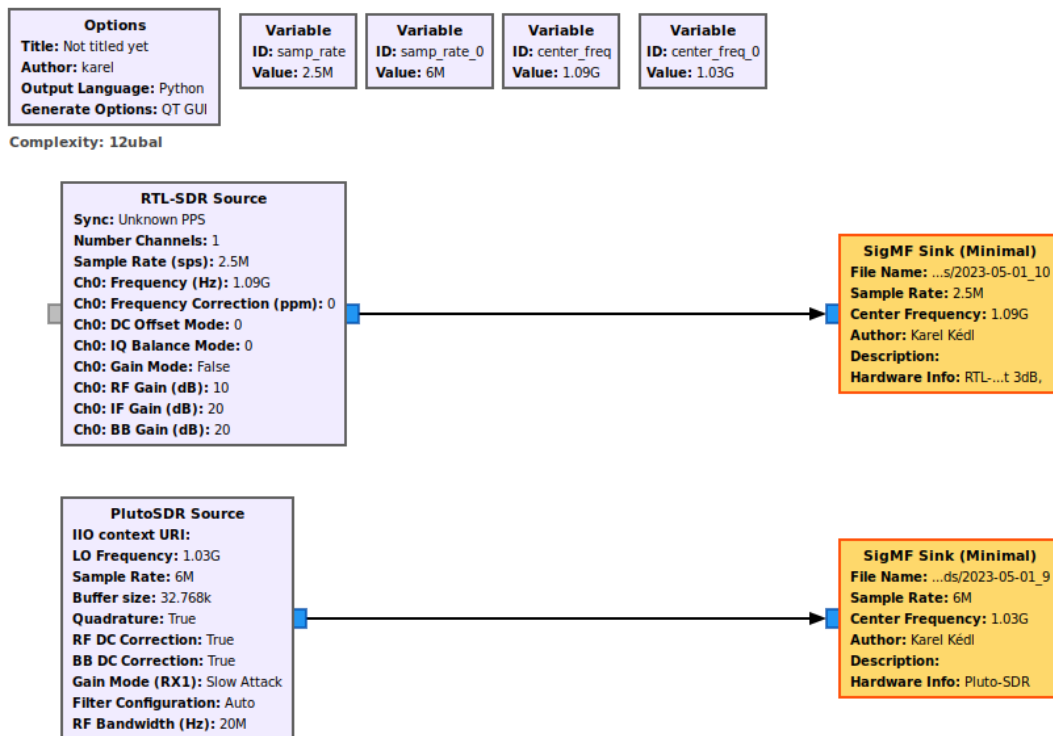
```
file_time = datetime.date.today().isoformat()
file_number = file_count(file_time)
```

Soubor má název `{file_time}-{file_number}.iq` Stejný kód jsem použil i ve skriptu `data_capture_pluto.py`. Vytvořený graf pro záznam je na obrázku 2.4. Soubory vytvořené grafickým prostředím GNU radio companion, mají koncovku `.grc`. Tlačítkem "Generate the flow graph" se vytvoří spustitelný soubor o stejném názvu jako soubor s příponou `.grc` jen koncovkou `.py`, v hlavním bloku je důležité nastavit v možnostech "Realtime Scheduling", aby měl program nejvyšší prioritu a nebyl přerušován jinými procesy v OS.

2.2.2 Spuštění skriptu

Pro připojení k rpi bez veškerých periférií (displej, klávesnice, myš) druhým počítačem lze použít SSH (secure shell), SSH je síťový protokol pro zabezpečené připojení přes nezabezpečenou síť. Použití programu raspberry Pi imager umožňuje zadat jméno a heslo wifi sítě a také umožnit vzdálené připojení přes SSH. Tím se provede konfigurace sítě rovnou při zápisu operačního systému na microSD kartu.

Pokud se neprovede konfigurace při zápisu os, lze dodatečně upravit konfigurační soubor `wpa_supplicant.conf`. Počítače musejí být připojené ve stejné síti, v mém případě hotspot z mobilního telefonu. Při připojování do sítě rpi vyjedná a dostane pomocí protokolu DHCP přidělenou IP adresu. IP adresu můžeme zjistit pomocí programu Angry IP Scanner, ten zobrazí i jméno počítače v síti, výchozí



Obrázek 2.4: Resample GNU radio

nastavení je "pi". Poté zadáme v terminálu příkaz: `$ ssh pi@"ip_adresa_rpi"`

Zbývá zadat administrátorské heslo vzdáleného počítače "super user", výchozí hodnota je "raspberry". Pro DragonOS_Pi64_Beta30 jsou výchozí údaje: jméno "ubuntu" a heslo administrátora "super user" je "dragon". SSH připojení otevře terminál vzdáleného počítače a můžeme instalovat potřebné knihovny a ovladače. Samozřejmě pokud je na této síti dostupné připojení k internetu.

Vzdálené připojení přes SSH i VNC lze použít také z chytrého mobilního telefonu. Příkazovou řádku terminálu přes aplikace Termius, Mobile SSH nebo RaspController.

Další možností spouštění zápisu dat je automaticky po spuštění raspberry Pi 4B. Třeba vytvořením nového servisu systemd:

```
$ cd /etc/systemd/system
```

Sem se umístí soubor "data-capture.service" a uvnitř souboru musí být:

```
[Unit]
```

```
Description=<Popis>
```



```
[Service]
User=<user e.g. root>
WorkingDirectory=<'plná cesta k souboru .py'>
ExecStart=''data_capture_pluto.py'' nebo ''GNUflow.py''
Restart=always
[Install]
```

```
WantedBy=multi-user.target
```

Následně se musí restartovat daemon a zavést nový servis:

```
$sudo systemctl daemon-reload
$sudo systemctl start data-capture.service
$sudo systemctl enable data-capture.service
```

Vytvoří se systémový servis, který odkazuje na záznamový skript.

Jedna z dalších možností jak automaticky spustit skript je přes `crontab`. To je tabulka, kterou používá program běžící na pozadí. Lze do ní zapsat periodicky se opakující proces, nebo právě odkaz na program po spuštění. Automatickou metodu spuštění jsem při měření nepoužíval a vždy jsem spouštěl skript ručně.

2.2.3 dump1030

Program je napsaný v jazyku C++ a autor vyzývá další výzkumníky a odborníky na spolupráci nad softwarem a implementací dekóovacího modulu pro 1030 MHz uplink. Autor programu vychází a bere si inspiraci z rozšířeného programu `dump1090` [25]. Použití `dump1030`.

```
$ cd /home/'username'/dump1030/dump1030
$ ./dump1030 --file 'jméno_souboru'.iq
```

Výstup je detekovaný počet dotazů společných módů a počet dotazů jednotlivých módů A,C,S. V tabulce 3.5 je počet detekovaných dotazů, ze souboru o velikosti 86 MB zaznamenaných pomocí `rtl_sdr` během 17,2 sekundy ve vzdálenosti 1,5 km od SSR Praha. Vychází to na 48,31 mód S dotazů za sekundu.



Tabulka 2.2: Výstup programu dump1030

Statistics of measured data with length of 85983232 bits:	
Messages recognized in total:	835
Mode A messages recognized:	2
Mode C messages recognized:	1
Mode A All-Call messages recognized:	1
Mode C All-Call messages recognized:	0
Mode A All-Call (Compatibility Mode) messages recognized:	0
Mode C All-Call (Compatibility Mode) messages recognized:	0
Mode S messages recognized:	831

2.2.4 Python

Programovací jazyk vyšší úrovně, python je vyvíjen jako open source projekt, který zdarma nabízí instalační balíčky. Python má usnadňovat vstup do světa programování a neustále se rozšiřuje jeho uživatelská základna. Údajně je to nyní nejpoužívanější programovací jazyk. Hojně se používá k tvorbě webových stránek, dále k datové analýze, strojovému učení a automatizaci. Python je multiparadigmatický jazyk a dynamicky typovaný, takže se nemusí předem deklarovat datový typ proměnné, navíc se může datový typ jedné proměnné v průběhu programu odkazovat na různé datové typy. Aktuálně používám verzi 3.9.12.

Knihovna `pyadi-iio` pro Pluto SDR poskytuje napojení na ovladače a knihovny `iio`, `libad9631` od Analog devices. Díky tomuto propojení je velmi snadné, začít s příjmem dat z SDR. Import knihovny:

```
>>> import adi
```

Knihovna `iio` pro python:

- Verze knihovny `iio` (0, 19, '5f5af2e')
- Verze knihovny `adi` '0.0.12'

Pro RTL-SDR přijmače je dostupná knihovna `pyrtlsdr` import:

```
>>> import rtlsdr
```

Po importu knihovny musíme vytvořit instanci objektu SDR rádia. Instance má definované metody



pro nastavení frekvence, nastavení vzorkovací frekvence, nastavení a režim zesílení zesilovače. Pluto SDR se liší pouze tím, že má automatické nastavení zesílení (AGC - Automatic Gain Control) v rychlém režimu a v pomalém režimu. A také má definovaný buffer jehož velikost lze nastavit a výstup metody příjmu vzorků má délku bufferu. U RTL-SDR se nastavuje pomocí metody příjmu vzorků jako vstupní argument přímo počet vzorků.

Knihovna numpy obsahuje matematické nástroje a umožňuje datové typování proměnných. Limitace je, že numpy nepodporuje menší typ komplexních čísel než complex64. To znamená dvě 32 bitová čísla s plovoucí řádovou čárkou. Vzhledem k rozlišení ADC v SDR rádiích, většinou 8-12 bitové převodníky, to vede ke generování nadbytečného datového toku. V podstatě šumu. Python je flexibilní a umožňuje napojení a ovládání hardwaru i digitální zpracování signálu. V pythonu se nedeklarují datové typy, podporuje i deklarování typů dat, ale není to výchozí standard. Jak je vidět v tabulce 2.3 je python extrémně nevhodný na objem dat.

Tabulka 2.3: Porovnání API RTL-SDR a pluto SDR

	Název knihovny v pythonu	Datový typ IQ vzorků	Rozsah složky komplexního čísla
RTL-SDR	pyadi	komplexní 128 bitové	$-1,7^{308}$ až $1,7^{308}$
Pluto SDR	pyrtlsdr	komplexní 128 bitové	$-1,7^{308}$ až $1,7^{308}$

jinja2

Knihovna pro formátování šablon značkovacích jazyků. Je rozšířena a používána pro tvorbu stránek a dokumentů v HTML, XML ale také dalších formátů jako například $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ a $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$. V programu 1030_report.py je nastavený formát pro umístění značek pro proměnné.

```
latex_jinja_env = jinja2.Environment(  
variable_start_string = '\VAR{',  
variable_end_string = '}',  
autoescape = False,
```



```
loader = jinja2.FileSystemLoader(os.path.abspath('.'))  
)
```

2.2.5 L^AT_EX

L^AT_EX je používán pro středně rozsáhlé až rozsáhlé technické dokumenty a vědecké články, ale může být použit pro jakoukoliv formu publikování. Je to nadstavba původního systému T_EX z poloviny 70. let 20. století. V LaTeXu je také vysázena tato práce.

Pro tvorbu reportu jsem vytvořil šablonu `1030_report_temp.tex`, ve které jsou připraveny místa s příznaky pro doplnění aktuálních údajů. Šablona `1030_report_temp.tex` je přílohou této práce. Program `1030_report.py` bere ze vstupního souboru údaje a vyplňuje je do příslušných míst. Jedna z proměnných je název csv souboru jež se generuje při běhu programu `1030_report.py`. Graf počtu dotazů v čase se vykresluje v latexu pomocí balíčku `pgfplot` přímo z csv souboru. Proměnné v šabloně jsou označeny `\VAR{''proměnná''}`. Výčet všech proměnných v šabloně je uveden v tabulce 2.4

2.2.6 Struktura dat

Pro záznam dat jsem se rozhodl implementovat otevřený standard SigMf (Signal Metadat Format) pro záznam IQ dat spolu s metadaty o podmínkách záznamu. Standard SigMF vzešel z akce DARPA brussels hackfest v roce 2017, kde se týmy zabývaly právě přenositelností a kompatibilitou dat vzniklých záznamem frekvencí pomocí SDR. SigMF dospěl do fáze 1.0.0, tuto verzi také používám ve svém kódu. Specifikace SigMF je přehledně popsána na githubu [20]. Existují i další standardy formátů, například digital RF, Midas BLUE, HDF5, eCPRI, VITA-49.

Zatím není SigMF plně zahrnut v GNU radio a podporuje zápis pouze omezeného množství metadat, konkrétně: datový typ, vzorkovací frekvence, naladěná frekvence, autor, popis záznamu a informace o hardwaru. Jsou podporovány tyto datové typy:

- komplexní plovoucí čísla (`fc32_le`),
- reálná plovoucí čísla (`rc32_le`),
- komplexní krátká (`sc16_le`),
- reálná krátká (`rc16_le`).



Tabulka 2.4: Výčet proměnných použitých v šabloně

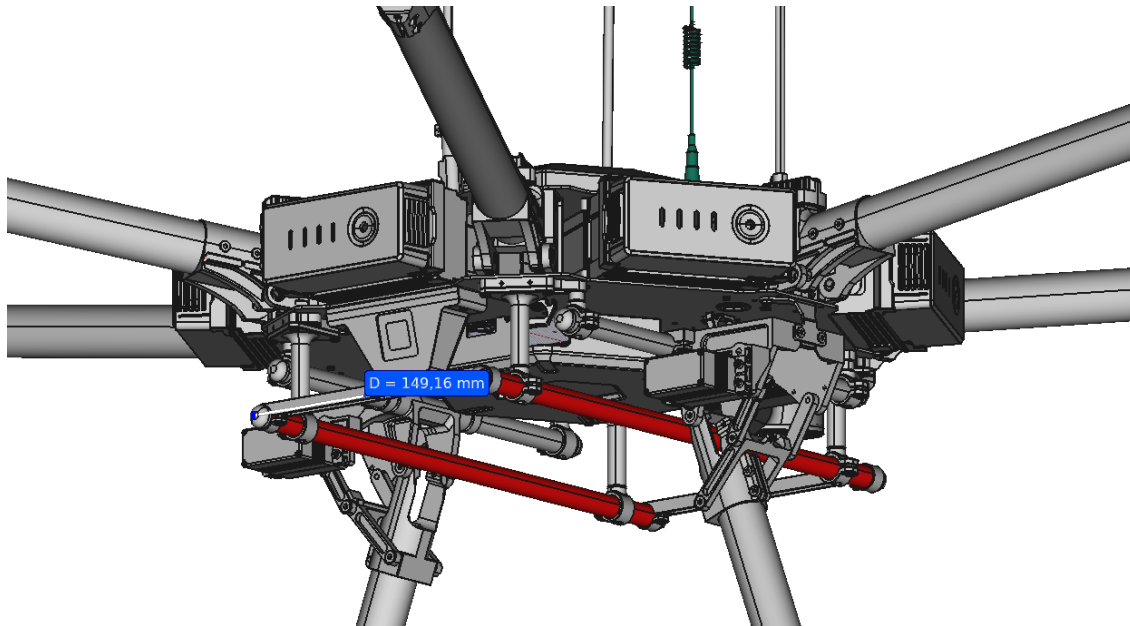
Proměnná	Popis
\VAR{input_file}	název vstupního souboru zadaný jako argument příkazového řádku
\VAR{file_path_only}	plná cesta k adresáři souboru
\VAR{Fs}	vzorkovací frekvence vstup uživatele nebo údaj z metadat
\VAR{sdr_type}	typ sdr rádia vstup uživatele nebo údaj z metadat
\VAR{hw_info}	dodatečné údaje vstup uživatele nebo údaj z metadat
\VAR{datum}	datum měření z časové značky souboru
\VAR{lenght}	doba záznamu
\VAR{size}	velikost vstupního souboru
\VAR{ymin_modes}	nejnižší zaznamenaný počet dotazů mód S
\VAR{ymin_modea}	nejnižší zaznamenaný počet dotazů mód A
\VAR{ymin_modec}	nejnižší zaznamenaný počet dotazů mód C
\VAR{ymax_modes}	nejvyšší zaznamenaný počet dotazů mód S
\VAR{ymax_modea}	nejvyšší zaznamenaný počet dotazů mód A
\VAR{ymax_modec}	nejvyšší zaznamenaný počet dotazů mód C
\VAR{ytick_modes}	10 hodnot od \VAR{ymin_modes} do \VAR{ymax_modes} včetně
\VAR{xmax}	čas v sekundách zaokrouhlený na desítky nahoru
\VAR{xtick}	15 hodnot od 0 do \VAR{xmax} včetně
\VAR{csv_file}	název csv souboru z jehož se vykresluje graf

Matadata v souboru mají formát běžného JSON, lze s ním pracovat i bez instalovaného SigMF. Oproti numpy je rozdílná konvence značení datových typů ze SigMF `fc32_1e` je vztažena ke složce komplexního čísla. V knihovně numpy to odpovídá `numpy.complex64` [24].

2.3 Bezpilotní prostředek

Jako nosič záznamového zařízení je pro účely letového měření použit dron DJI Matrice 600 Pro fakulty dopravní. Pro zavěšení užitečného zatížení, jsou na dronu dvě hrazdy z uhlíkového kompozitu s roztečí

149,1 mm a průměrem 12 mm, na obrázku 2.5 jsou vyznačeny červeně. Limit pro zatížení dronu je 6 kg [21]. Výdrž ve vzduchu dronu bez zatížení je přibližně 30 minut, zatížení výrazně zkracuje dobu výdrže. Z tohoto důvodu je vhodné sestavit pokud možno záznamové zařízení s co nejmenší hmotností.



Obrázek 2.5: Prostor pro zavěšení užitečného zatížení

Udávaný dostup je 500 m, nicméně dosah signálu je 5000 m a maximální nadmořskou výšku pro let uvádí výrobce 2500 m. Jako limit je opravdu nastaven softwarově dostup 500 m AGL a nelze jej odblokovat. Záznam letu se ukládá do souboru s koncovkou `.kmz`, přes další aplikace lze data exportovat do formátu CSV, kde je ve sloupcích čas, absolutní čas, výška z GPS, poloha a mnoho dalších méně podstatných údajů. Údaj zaznamenaného času používám k sesouhlasení se zaznamenanými daty signálu. Výšku vykresluji v grafu spolu s počty dékodovaných přijatých dotazů.

Na obrázku 2.6 je navržena sestava ve 3D modelu s veškerým hardwarem včetně horní antény. K dosažení většího pokrytí při měření, by byl ideální dron, u kterého lze odblokovat maximální dostup na vyšší hodnoty než 500 m. Dron DJI 300 RTK umožňuje dosáhnout výšky nad zemí až 1500 m. DJI 300 je oproti DJI 600 menší a má i nižší nosnost nákladu 3 kg oproti 6 kg. Záznamové zařízení má hmotnost včetně předimenzované těžké powerbanky 1,2 kg. Pro použití k měření stačí jen přizpůsobit zavěšení pro konkrétní dron. DJI 300 má zavěšení nákladu řešeno odlišně oproti DJI 600. Návrh přizpůsobení je na obrázku 2.7 porovnání klíčových parametrů obou dronů je v tabulce 2.5. Měření s dronem RTK300 nakonec neproběhlo.



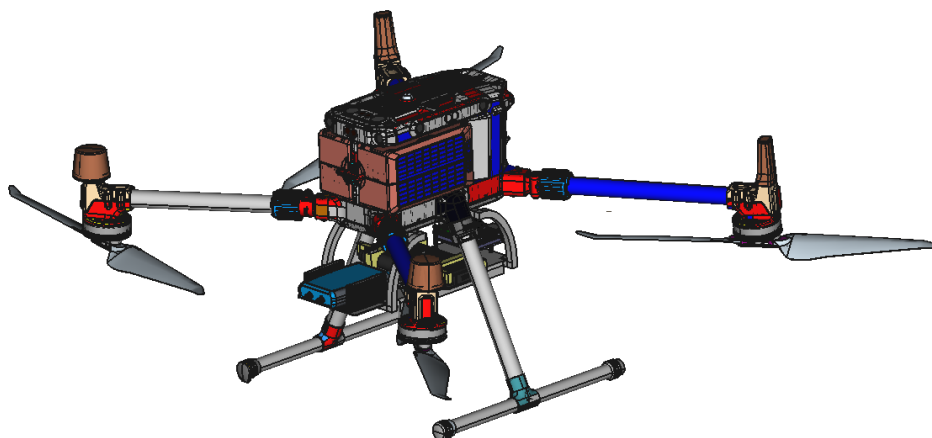
Obrázek 2.6: Kompletní 3D sestava z horního pohledu DJI 600 PRO

Tabulka 2.5: Porovnání parametrů dronů [26],[21]

Parametr	DJI600 PRO	DJI300 RTK
Výdrž (min)	32	55
Max užitečné zatížení (kg)	6	2,7
Max dostup (m.n.m.)	2500	7000
Kapacita baterie (mAh)	4500	5935
Stoupavost (m/s)	5	6

2.4 Letové měření

Měření probíhalo mezi obcemi Vojnice a Klapý v Ústeckém kraji nedaleko zříceniny Hazmburk. Přesné zeměpisné souřadnice jsou 50,4243631 s. š, 13,9694314 z. d. Jde o volný prostor bez bezprostředních překážek. Na obrázku 2.8 je vyznačeno místo měření s širší situací okolních přehledových stanic, jejich souřadnice jsou uvedeny v tabulce 2.6. V plánu bylo, během letu dosáhnout maximální možné výšky nad terénem s výdrží na místě po dobu jedné minuty a následné sklesání zpět. Tento profil se použil



Obrázek 2.7: Kompletní 3D sestava z horního pohledu DJI 300 RTK

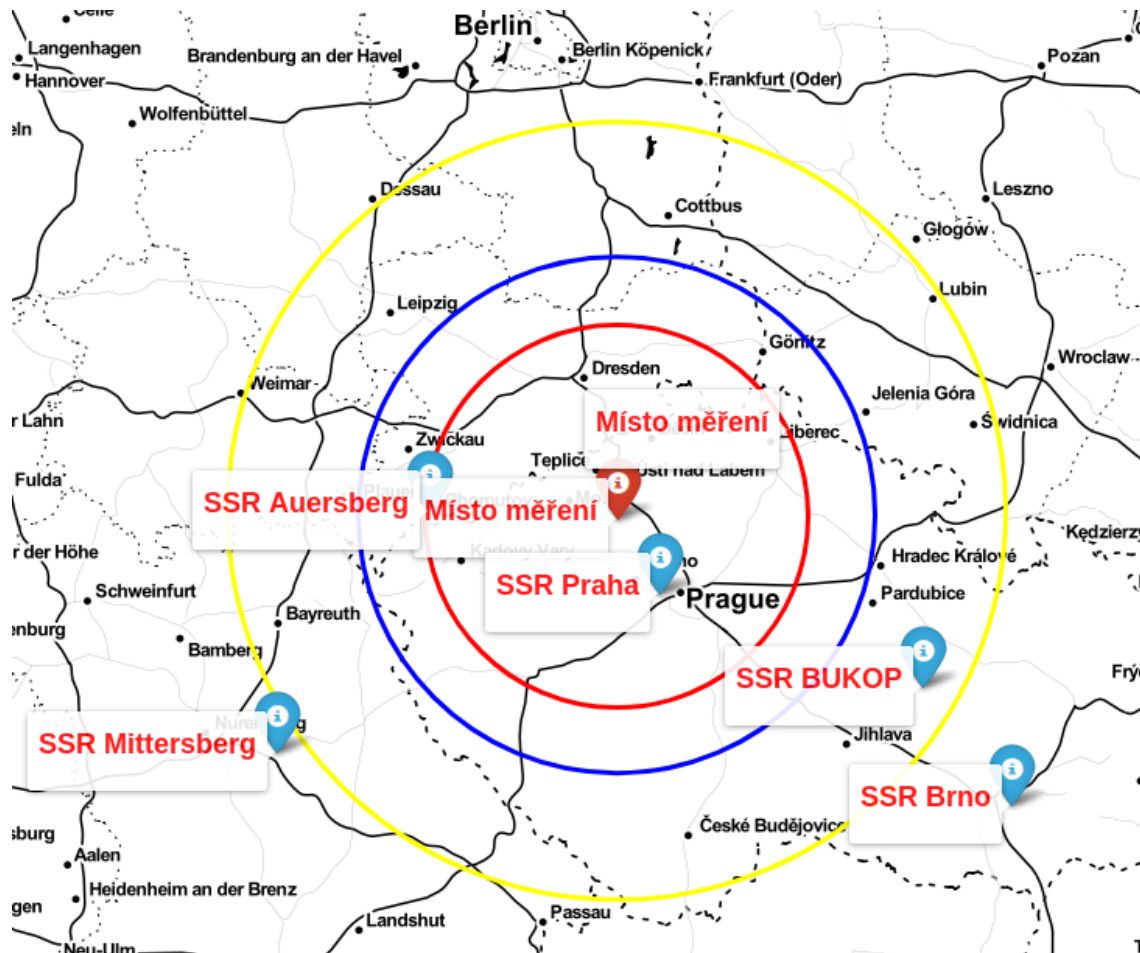
pouze u prvního měření. Při dalších měření se prováděla výdrž po dobu 30 sekund, po sto metrech výšky.

Tabulka 2.6: Souřadnice místa měření a okolních SSR radarů

	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka
Místo měření	50,4243631	13,9694314
SSR Praha	50,0866644	14,2703875
SSR BUKOP	49,6596217	16,1334042
SSR Brno	49,1205000	16,7591000
SSR Auersberg	50,4557733	12,6484581
SSR Mittersberg	49,3598797	11,5632417

2.5 Záznam dat

Pro zdroj dat z Pluto SDR jsou v GNU radio aktuálně dvě možnosti. První je přes `gr-iiio`, před verzí 3.10 šlo o vedlejší modul, který se musel doinstalovávat samostatně. Od verze 3.10 je plnou součástí GNU radio. Druhou možností je funkční blok ze seznamu `gr-soapy`. Soapy je subsystém ovladačů,



Obrázek 2.8: Měření a okolní SSR

v tomto případě je GNU radio klient soapy. Soapy v tomto případě poskytuje specifikace ovladačů, vyhledávání a řízení ovladačů a dělá prostřednickou vrstvu pro hardware. Soapy většinou nepodporuje ovládání úplně všech funkcí toho daného SDR. RTL-SDR je také na seznamu podporovaného hardware přes soapy. Ale má také funkční blok z `gr-osmosdr`, který je přímo propojený s knihovnou `librtlsdr`.

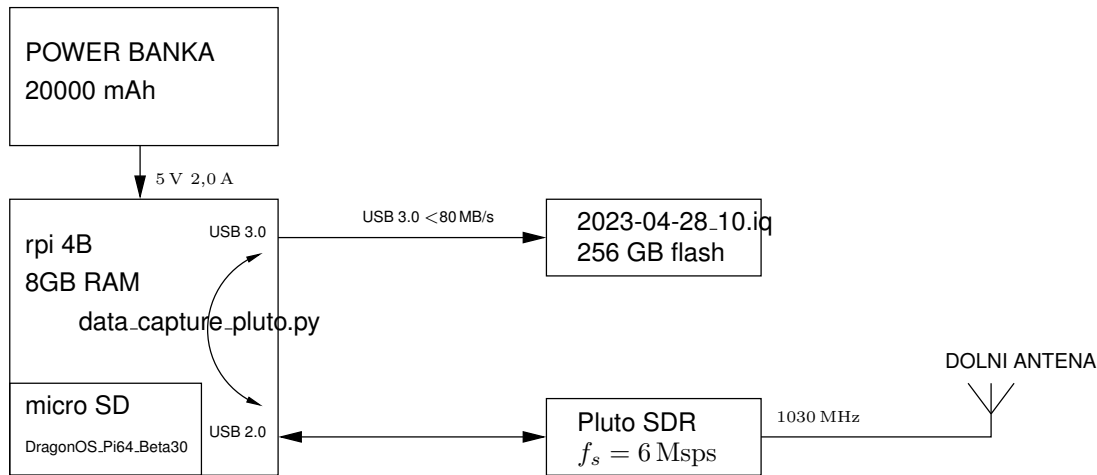
Datový tok vzorků při minimálních vzorkovacích frekvencích 2 a 4 Msps datového typu 64 bitových komplexních čísel tj. každý vzorek má 8 bajtů. Bude výsledný tok dat na disk 48 MB/s. Pythonový soubor s příponou `.py` lze spouštět bez grafického prostředí. Pro tuto možnost je nutné v možnostech nastavit volbu "NO GUI". Ukázalo se, že v den měření jsem tuto volbu neměl nastavenou.

Záznam jsem provedl alternativně pomocí skriptu `data_capture_pluto.py` přiloženém v příloze, se kterým jsem experimentoval dříve. Skript nejdříve zkontroluje, zda existuje soubor "YYYY-MM-DD_log.txt" (datum ve formátu ISO 8601). V případě, že není, vytvoří ho a ukládá počet spuštění



záznamového skriptu v ten den. Na obrázku 2.9 jsou komponenty se kterým bylo provedeno měření. Skript zaznamenával jen jednu frekvenci z Pluto SDR, proto nebylo použito RTL-SDR ani horní anténa.

Vytvořený soubor s binárními daty nezpracovaných vzorků z SDR přijímače má příponu `.iq` a je ve formátu `YYYY-MM-DD_N.iq`, opět datum ve formátu ISO 8601 a N je pořadové číslo měření. Každý vzorek tvoří dvě 32 bitová čísla `float` 32 fázově posunutě o 90° a ve fázi.



Obrázek 2.9: Blokové schéma hardwaru v den měření 28.4.

Další nezbytný předpoklad pro zaznamenání dlouhého časového úseku dat je souborový systém disku, na který se zapisuje. Při měření jsem měl flash disk formátovaný na souborový systém FAT16 a to způsobilo po zapsání 4,3 GB chybu a ukončení zápisu. Je třeba mít disk formátovaný na ext4, tak se neomezí maximální velikost souboru na disku. Soubor má časovou značku poslední úpravy v pythonu a získá se získá pomocí balíčku `os` a `datetime`: `datetime.datetime.fromtimestamp(os.path.getmtime(file_path))`. Výsledný zaznamenaný soubor má název `2023-04-28_10.iq` velikost 4,3 GB a časovou značku 11:21:36.

Časovou značku vytvoření a poslední úpravy souboru jsem získal manuálně. V tuto chvíli není přímo v pythonu možné zjistit časovou značku vytvoření souboru přes `os.stat('plná cesta k souboru')`, musel by se z pythonu volat přes metodu `subprocess.run()` unixový příkaz `stat 'název souboru'`, kde je parametr `Birth`.



2.6 Zpracování signálu

Aby bylo možné demodulovat signál a dekodovat počet zpráv v programu dump1030, musí se změnit vzorkovací frekvence a datový typ souboru. Program na vstupu očekává osmibitová celá čísla bez znaménka `uint8` o vzorkovací frekvenci 2,5 MHz. K tomuto účelu jsem vytvořil skript `resampler2sigmf.py` v jazyku python.

2.6.1 Resampler2sigmf

Skript `resample2sigmf.py` vezme vstupní soubor s datovým typem `numpy.complex64` s koncovkou `.iq` nebo `.sigmf-data`. Pokud je vstupní soubor s koncovkou `.iq` vzorkovací frekvenci musí zadat uživatel, jako další volitelné vstupy jsou typ SDR a ostatní informace o hardwaru. Skript nejdříve vypočte poměr původní vzorkovací frekvence proti požadované vzorkovací frekvenci. V případě naměřených dat jde o převod ze vzorkovací frekvence 6 Msps na 2,5 Msps, poměr je 2,4. Pokud vyjde neceločíselný poměr, přejde se k interpolaci vzorků, aby byl poměr celočíselný.

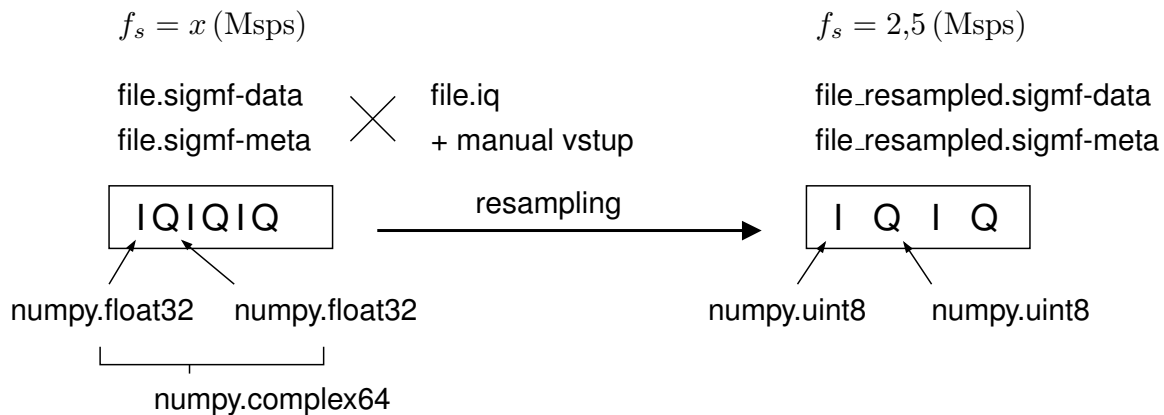
```
samples = signal.resample_poly(file_samples64, interpolate_factor, 1)
```

Poté se vzorky decimují na novou vzorkovací frekvenci.

```
samples = samples[::decimation_factor]
```

Nakonec se přepočítávají hodnoty na výstupní datový typ v rozsahu 0 - 255 `uint8`. Aby se mohly zpracovávat soubory o velkých objemech dat, načítají se do paměti vzorky za jednu sekundu, zpracují se a rovnou probíhá zápis dat do nového převzorkovaného souboru. Nový soubor má název ve tvaru: `''původní_název''_resampled.sigmf-data`. Metadata se ukládají se stejným názvem s koncovkou `.sigmf-meta`. V případě vstupního souboru s metadaty se jen překopírují do nového souboru. Pokud dochází k převodu ze souboru bez metadat zapisují se vstupy uživatele. Na obrázku 2.10 jsou vyznačeny vstupní a výstupní parametry datových souborů.

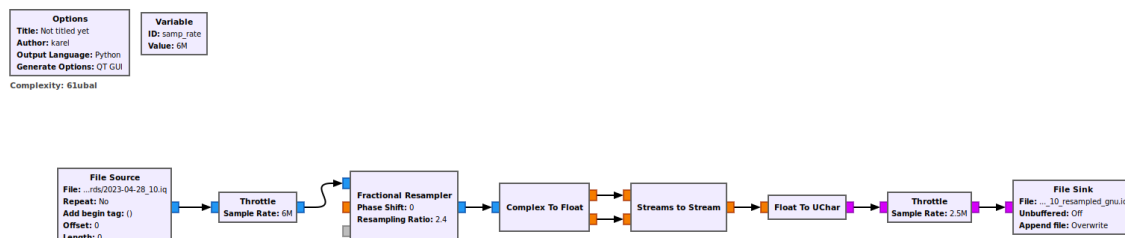
Program GNU radio má funkční blok umožňující převzorkování s neceločíselným poměrem v jednom kroku. Jde o blok `''Fractional Resampler''`. Součástí GNU radio jsou také funkční bloky pro změnu datových typů. Vyzkoušel jsem převzorkování a změnu datového typu, pro úpravu na vstup pro dump1090 pomocí GNU radio podle sestavených bloků na obrázku 2.11. Na obrázku 2.12 jsou podporované datové typy v GNU radio. Zpracování pomocí GNU radio je mnohem rychlejší a trvá



Obrázek 2.10: Změna vzorkovací frekvence a datového typu

pouze po dobu přehrání vstupního datového souboru. Zpracování pomocí skriptu `resample2sigmf.py` je časově mnohem náročnější.

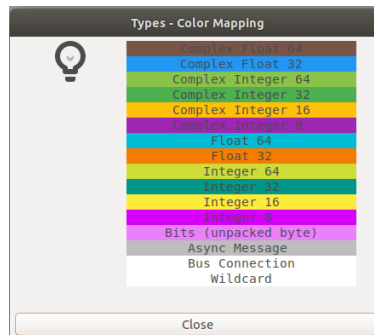
Při porovnání souborů z obou konverzí vyšlo, že souboru z GNU radio chybí 835479 vzorků. V souboru ze skriptu `resample2sigmf.py` chybí 62458 vzorků, to si vysvětlují postupným zpracováním o délce úseku vzorkovací frekvence, poslední úsek souboru bude kratší a tam by mohlo dojít k zahazení vzorků. Pro další zpracování tedy vycházím ze souboru `2023-04-28_resampled.sigmf-data`. Tento soubor už není kompatibilní s funkčním blokem GNU radio sigmf source.



Obrázek 2.11: Resample GNUradio

2.6.2 1030_report

Program `1030_report.py` používá přepracované části ze skriptu `resample2sigmf.py`. Hlavní myšlenka za tímto programem je automatizovat vyhodnocení zaznamenaných datasetů a dosazení výsledků do šablony zprávy z měření. V šabloně jsou umístěné formátovací značky pro systém šablon



Obrázek 2.12: Datové typy v GNUradio

Jinja2. Program následuje princip funkcionálního přístupu k programování. Pro lepší přehlednost a kategorizaci funkcí hlavní program importuje pomocné moduly a poté volá jednotlivé funkce v nich.

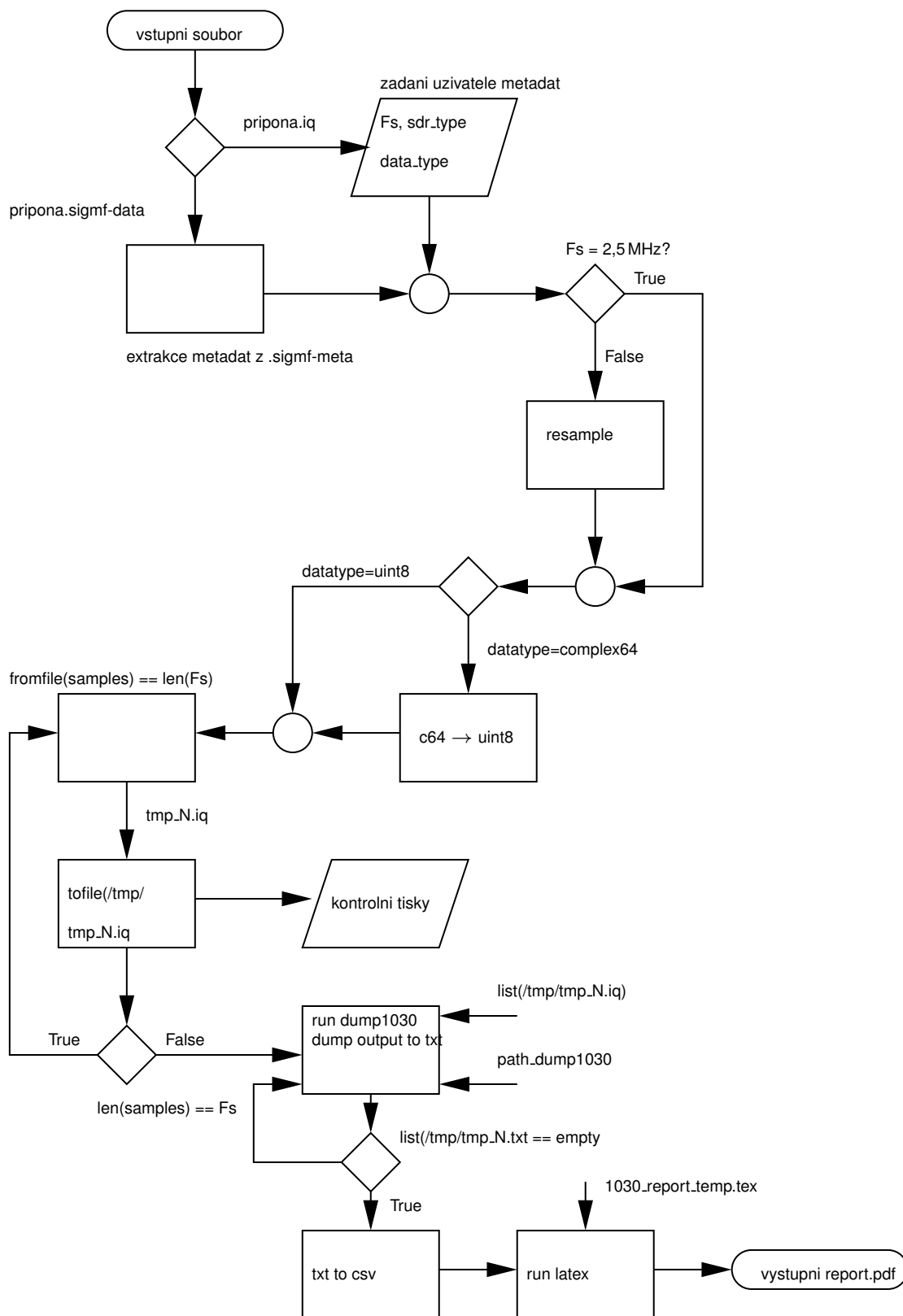
Nepoužívám multiprocessing ani threading, program běží pouze na jednom jádru procesoru, proto je zpracování časově velmi náročné. Vývojový diagram je připojen na obrázku 2.13. Protože program na velkém souboru o desítkách GB běží několik hodin přidal jsem kontrolní tisky, abych měl jistotu, že se stále něco děje a program nezamrzl na obrázku 2.14 jsou vidět kontrolní tisky z převzorkování souboru 1030_2023-06-30_0.sigmf-data.

resampler

Modul `resampler.py` obsahuje funkce k převzorkování souboru v případě jiné, než vstupní vzorkovací frekvence 2,5 MHz, v této funkci se také mění datový typ. Funkce vezme počet vzorků odpovídající vstupní vzorkovací frekvenci převzorkuje data, změní datový typ na `uint8` a uloží do dočasného adresáře `/tmp/'název_souboru'_'_'pořadí'.iq`. Další funkce bere na vstupu jako argument seznam těchto souborů a cestu k umístění programu `dump1030`. Na každém souboru z dočasného adresáře pustí program `dump1030` a jeho výstup zachytí do textového souboru.

csv_reader

V modulu `csv_reader.py` jsou napsané funkce k extrakci dat z textových souborů a vybraná data počet dotazů mód A, mód C a mód S, zapisuje do csv souboru ze kterého se poté vykresluje graf do finálního reportu.



Obrázek 2.13: Vývojový diagram report_1030.py



```
karel@acer: /media/karel/samsung256
Údaje z get input file: input_file=/media/karel/samsung256/1090_2023-06-30_0.sigmf-data', dir_path=/media/karel/samsung256', file_name='1090_2023-06-30_0.sigmf-data'
Fs=6000000.0
hw_info='Pluto sdr, data capturing for diploma thesis'
file is this much samples file_len=3711421312 np.fromfile is working everything so far so good
data z resample: Fs_input=6000000.0, Fs_output=2500000.0, datatype_read=<class 'numpy.complex64'> <class 'type'>
decimation_factor=72, <class 'int'>, 72, <class 'int'>
datatype_read=<class 'numpy.complex64'>, <class 'type'>
number of seconds of the file to process 309.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 308.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 307.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 306.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 305.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 304.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 303.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 302.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 301.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 300.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 299.5 from 309.5
number of seconds of the file to process 298.5 from 309.5
```

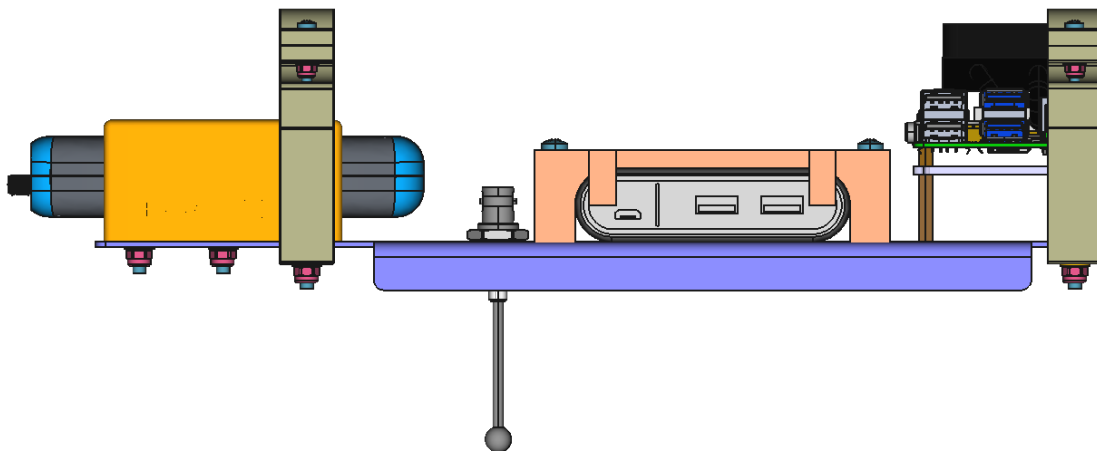
Obrázek 2.14: Kontrolní tisky programu report 1030

3 Prezentace výsledků

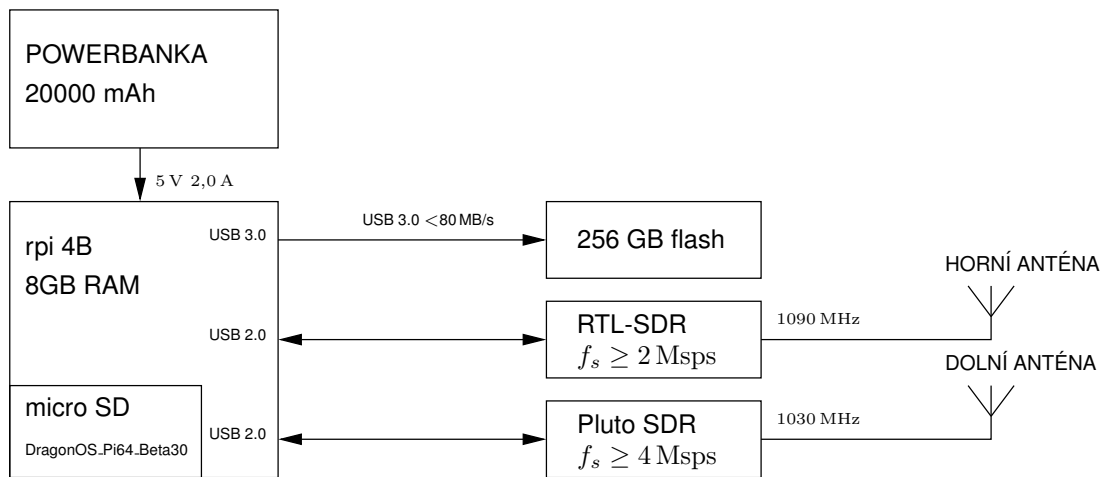
V rámci diplomové práce jsem vytvořil 3D model měřicí sestavy i s dronem DJI Matrice 600. Všechny modely mnou vytvořené jsou dostupné v 3D knihovně grabcad [31]. Kritériem pro návrh bylo použít pouze běžné a dostupné komponenty ve vlastnictví laboratoře ULD a nebo z vlastních zdrojů. Všechny komponenty jsou umístěny na duralové základně tloušťky 1,2 mm.

Uchycení externí baterie (powerbanka) umožňuje přístup ke všem jejím konektorům. Na obrázku 3.1 je vidět umístění rpi 4 a závěs zhotovený na 3D tiskárně. Závěs neumožňuje přístup k ethernetovému portu rpi 4, ale přístup k portu není potřeba nepoužívám jej. Na obrázku 3.1 není zobrazeno RTL-SDR, které se připevňuje dodatečně stahovacími páskami na horní stranu powerbanky. K upevnění Pluto SDR k základně jsem použil již hotový držák od tvůrce DM4DS [32]. Kompletní blokové schéma i s RTL-SDR je na obrázku 3.2.

Model sestavy jsem zasadil do okolí, to znamená usadil ji i na 3D dron DJI 600. Na webových stránkách výrobce dronu je volně ke stažení nižší řada modelu M600, ale ta se v podstatném místě uložení užitečného zatížení neliší. Rozdíl je v horní části, kde se nachází avionika a antény. Díky tomu nebylo nutné hardwarovou sestavu ani jednou iterovat [33].



Obrázek 3.1: 3D model



Obrázek 3.2: Blokové schéma sestavy

Všechny komponenty kromě antény pro 1090 MHz, jsou umístěny na jedné platformě zavěšené pod dronem DJI Matrice 600 Pro, kam se běžně umísťuje i jiné zatížení. Anténa pro 1090 MHz se umísťuje na horní povrch dronu pomocí 3M Dual-Lock™ SJ4570. Plošina je upevněna na kompozitové hrazdy k tomu určené. Celá sestava má hmotnost 1,2 kg, včetně šroubů a kabelů. Záznamový skript běží na rpi 4 a data se ukládají na usb disk s kapacitou 256 GB. Výsledkem jsou dva binární datové soubory s příponou .sigmf-data a dva soubory metadat s příponou .sigmf-meta. V souboru metadat jsou uloženy naladěné frekvence, vzorkovací frekvence, datové typy vzorků, použité SDR rádio, a ostatní hardware a poznámky o měření.

3.1 Finální verze platformy

Hardware:

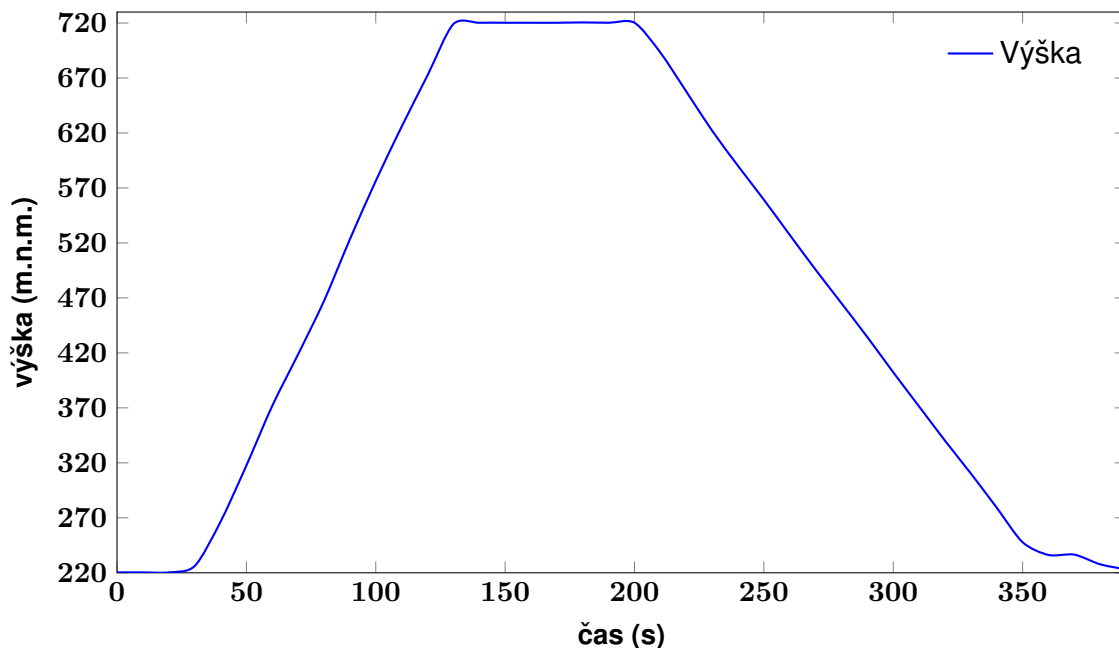
- raspberry Pi 4, 8 GB,
- Pluto SDR,
- koaxiální kabel 63,5 mm RG-58C/U BNC-SMA,
- anténa TED 104-12,
- RTL-SDR V3 (volitelné),
- anténa 3dBi ADS-B 1090MHz SMA s koaxiálním kabelem RG-178 3 m (volitelné),



- powerbanka ANKER a1274 s kapacitou 20000 (mAh),
- micro SD karta 64 GB,
- usb disk 256 GB.

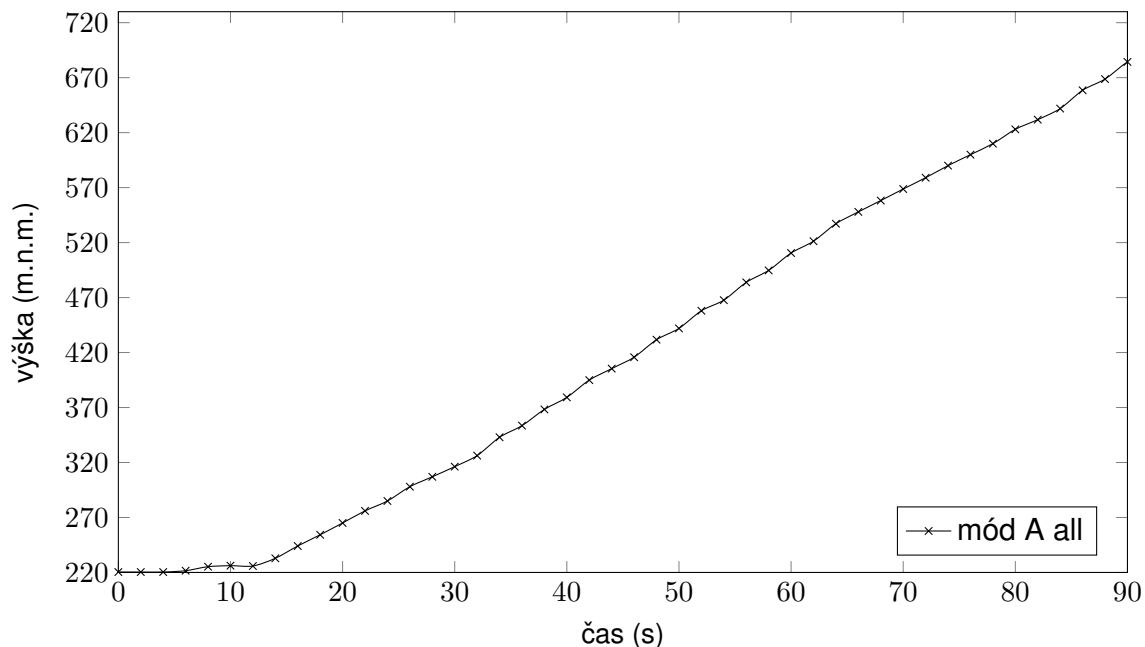
Jako zdroj napájení pro rpi 4 jsem použil svoji powerbanku anker s kapacitou 20000 mAh, články uvnitř mají napětí 3,7 V to je kapacita 74 Wh. To postačí pro napájení rpi4 na 6,5 hodin při maximálním odběru proudu 3,5 A. Při záznamu dat napájí rpi 4 přes USB obě SDR a celý systém má spotřebu 2 A. Napájení měřicí sestavy tedy vydrží na 7 hodin a 15 minut.

28.4. proběhl jeden měřicí let, toto měření proběhlo nestandardně, protože záznam byl pořízen skriptem `data-capture-pluto.py` v tomto skriptu není použitý žádný buffer a během doby zápisu dat na flashdisk se vzorky nenačítají do paměti a jsou ztraceny. Tím je způsobena nedefinovaná nekontinuita dat. Z dat ve flight logu DJI je na obrázku 3.3 vykreslený vertikální profil celého letu z 28.4. z dat lze odečíst stoupavost 5,065 m/s, oproti specifikaci 5 m/s se liší nepatrně a zátěž nemá negativní vliv na stoupání dronu.



Obrázek 3.3: Vertikální profil celého letu z 28.4.

Z důvodu dosažení maximální velikosti souboru v souborovém systému FAT16 do něj byla naformátován usb disk se zapsalo pouze 4,3 GB dat. Průběh výšky po čas zápisu dat je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Nastoupaná výška v průběhu záznamu dat 28.4.

Je vidět, že se zachytila pouze část výstupu do výšky 684,3194 m.n.m. , tedy těsně před dosažením maximální výšky 720,5472 m.

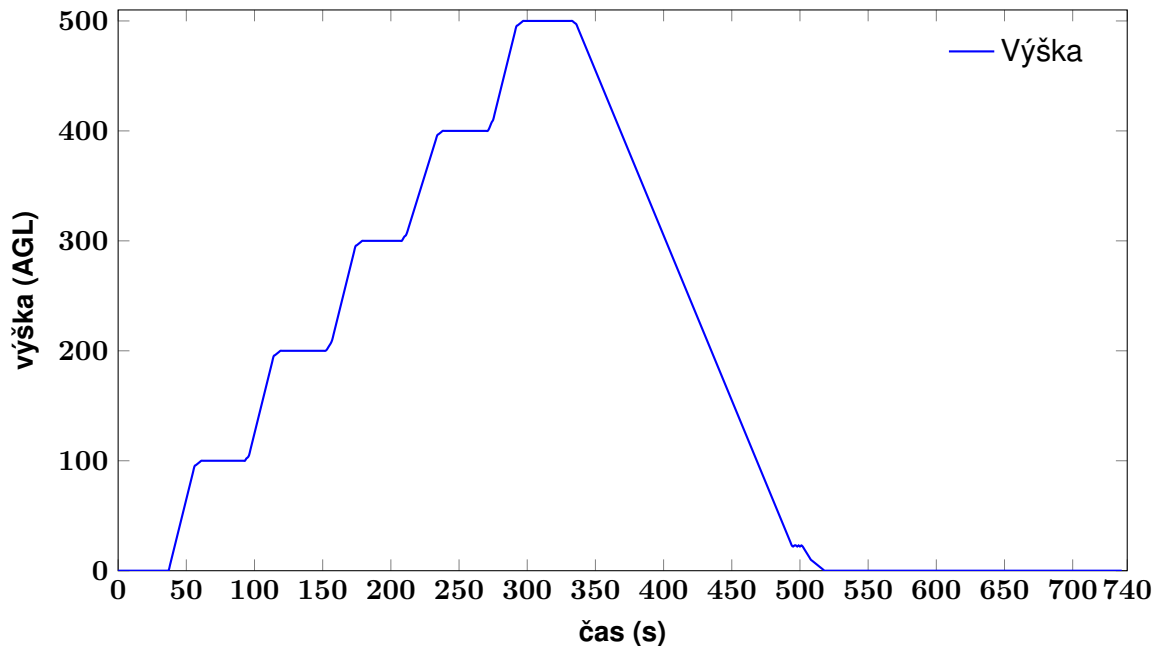
30.6. proběhly 3 lety s různými parametry záznamu. Schéma profilu letu bylo následující: výstup do výšky nad zemí 100 m, výdrž 30 sekund, poté výstup na další stovku metrů. Při prvním letu byl záznam pořízen pomocí RTL-SDR přes program `rtl_sdr` s naladěnou frekvencí 1030 MHz a vzorkovací frekvencí 2,5 Msp. Spouštěcí příkaz:

```
rtl_sdr -f 1030000000 -s 2500000 /media/ubuntu/samsung256/2023-06-30_1.iq.
```

Při druhém letu byl použit záznamový program `data-rec.py` vygenerovaný z grafu GNU radio `data-rec.grc`. V grafu jsou RTL-SDR i Pluto SDR, každý má svůj blok záznamu dat.

Let proběhl podle popsaného výškového schéma. Přehled nastavených parametrů a objemu zaznamenaných dat je uveden v tabulce 3.1. Třetí let byl zaznamenán pomocí skriptu `data-pluto.py` z grafu stejného názvu s příponou `.grc`, během letu se ve vzdáleném prostoru pohybovalo sportovní létající zařízení, výstup byl proto přerušen a pokračovalo se až po vzdálení sportovního létajícího zařízení. To je důvod, proč poslední trval déle oproti ostatním. U žádného z těchto letů nedošlo k záznamu flight logu a údaje o průběhu výšky letu nejsou dostupná. V grafu na obrázku 3.5 je ze známých údajů o stoupavosti dronu a času vyčkávání ve výšce po 100 metrech pokus o rekonstrukci

výškového profilu prvního letu. Na časové ose je průběh celého záznamu, delší pauza na konci záznamu po přistání dronu lze přičíst skutečnosti, že rpi musí zachytit wifi hotspot a přihlásit se k němu. Poté následuje přihlášení do rpi přes SSH a samotné ukončení záznamu.



Obrázek 3.5: rekonstrukce profilu letu z 30.6.

Na obrázku 3.6 je sestavená měřicí platforma namontovaná na dronu DJI 600 Pro v den měření. Obrázek 3.7 s trasou letu a situace měření je z webové aplikace pro dekódování letových záznamů DJI [30] z obrázku je patrné, že v místě měření je volný výhled do všech stran nejméně na vzdálenost 3 km.

3.2 Výsledky měření

Výsledkem měření jsou počty zpráv jednotlivých módů dotazů. Výstupy z programu dump1030 po jednotlivých módech jsou vykresleny na grafech na obrázcích 3.23, 3.21, 3.22, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14. Celý let trval 6 minut 29 sekund, stoupaní do výšky 500 AGL trvalo 1 minutu 52 sekund, poté proběhlo minutové vytrvání ve výšce a následoval sestup a přistání, sestup trval přibližně 3 minuty. Z obrázků plyne, že dotazy módu S byli zaznamenány hned po zapnutí záznamu, kdy byl dron ještě na zemi. Nejvyšší počet dotazů módu S 428 byl zaznamenán 6 sekund před dosažením maximálního dostupu dronu. Z grafu je také vidět, že sestup trvá déle než výstup. Toto je také konzistentní se specifikací dronu, udávaná rychlost sestupu je 3 m/s [33].



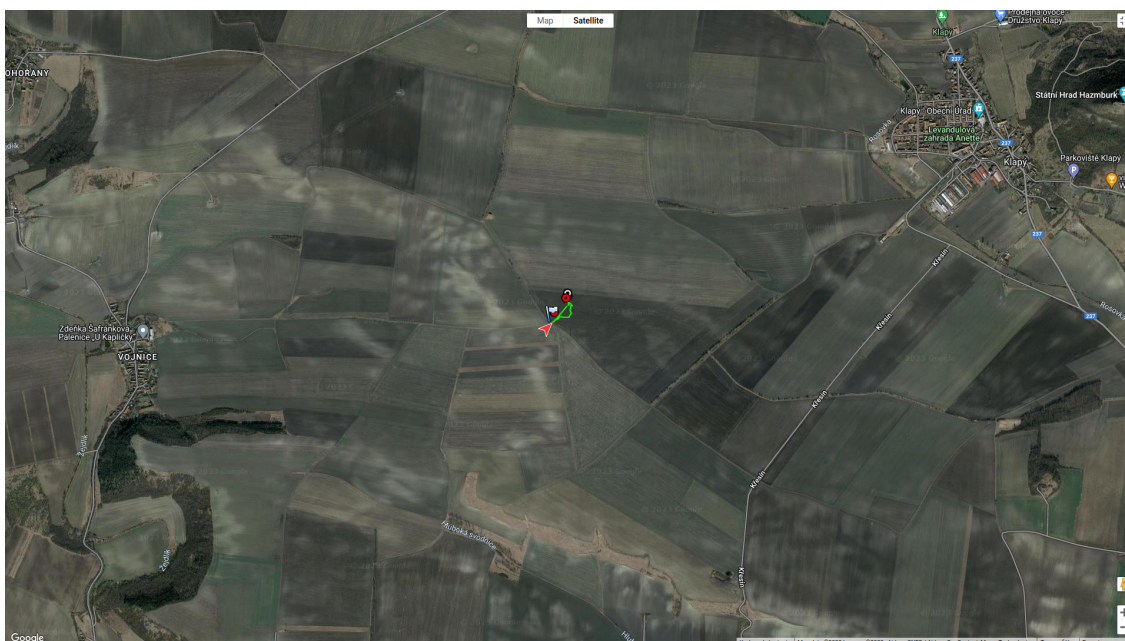
Tabulka 3.1: Záznam dat jednotlivých letů

datum	28.4.2023	30.6.2023		
		1. let	2. let	3. let
objem dat záznamu (GB)	4,3	3,7	14,9	23,4
zaznamenávané frekvence (MHz)	1030	1030	1030/ 1090	1030
vzorkovací frekvence (Mps)	2,5	6	6/ 2,4	6
záznamový graf/skript	data-capture-pluto.py	rtl_sdr	data-rec.grc/ data-rec.py	data-pluto.grc/ data-pluto.py
datový soubor	2023-04-28_10.iq	2023-06-30_1.iq	1030_2023-06-30_0.sigmf-data	1030_2023-06-30_2.sigmf-data
flight log	2023-04-28_[19-19-37].kmz	-	-	-
datový typ	complexfloat64	uint8	complexfloat64	complexfloat64

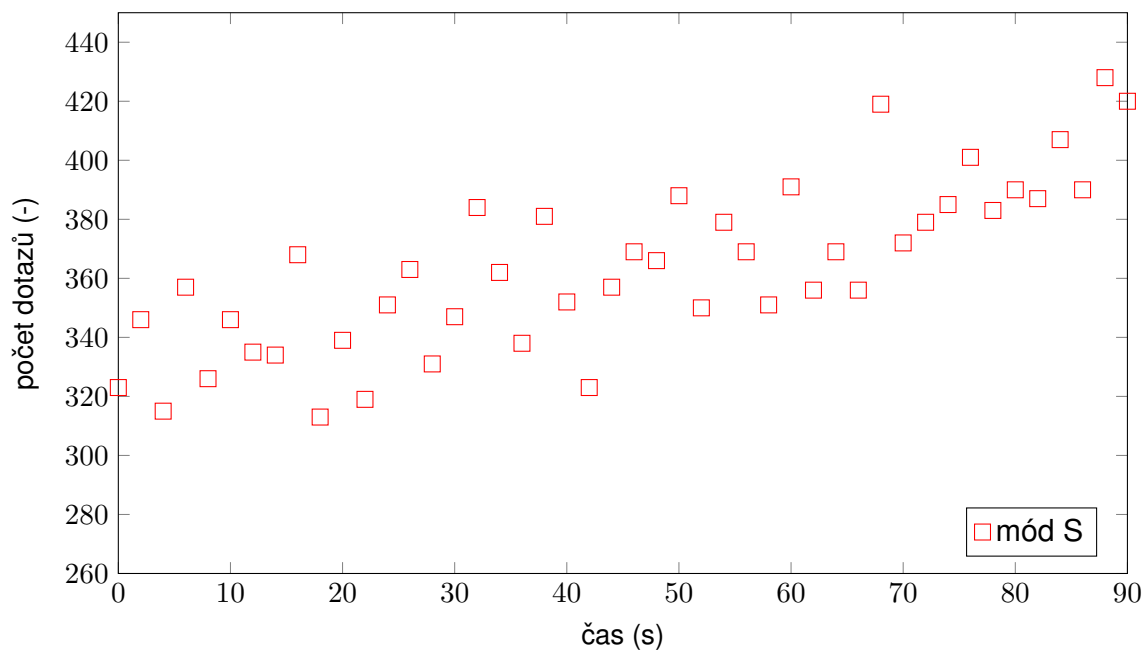
3.2.1 28.4. výsledky měření



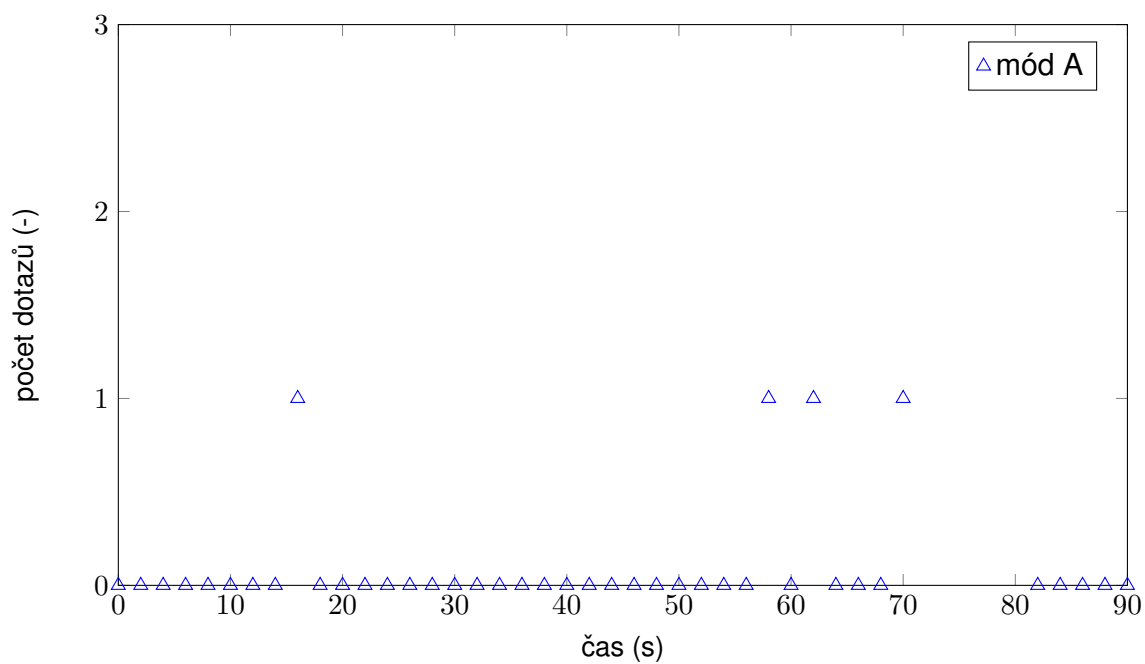
Obrázek 3.6: DJI M600 PRO s měřícím přístrojem se svolením autora



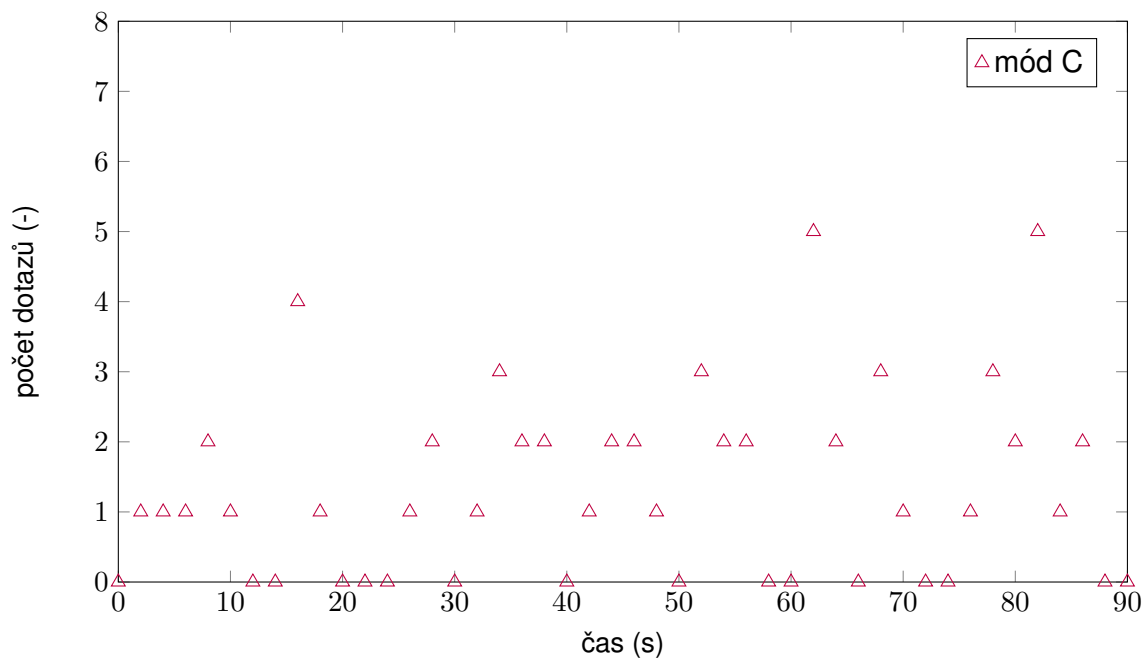
Obrázek 3.7: Situace měření s trasou letu



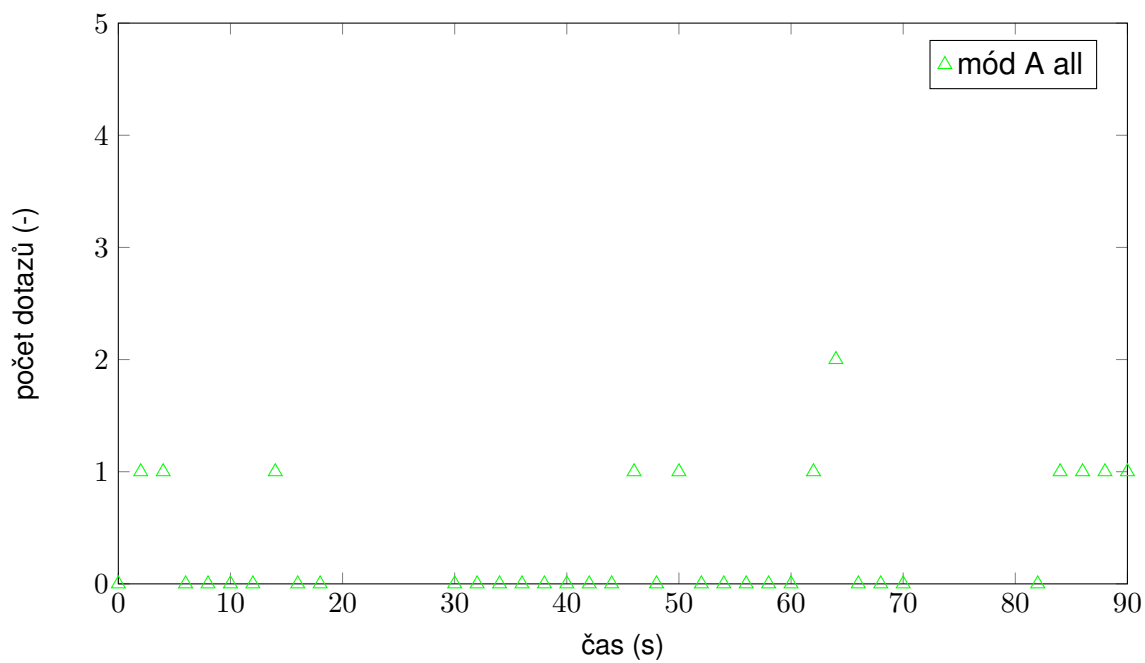
Obrázek 3.8: Počet dotazů mód S



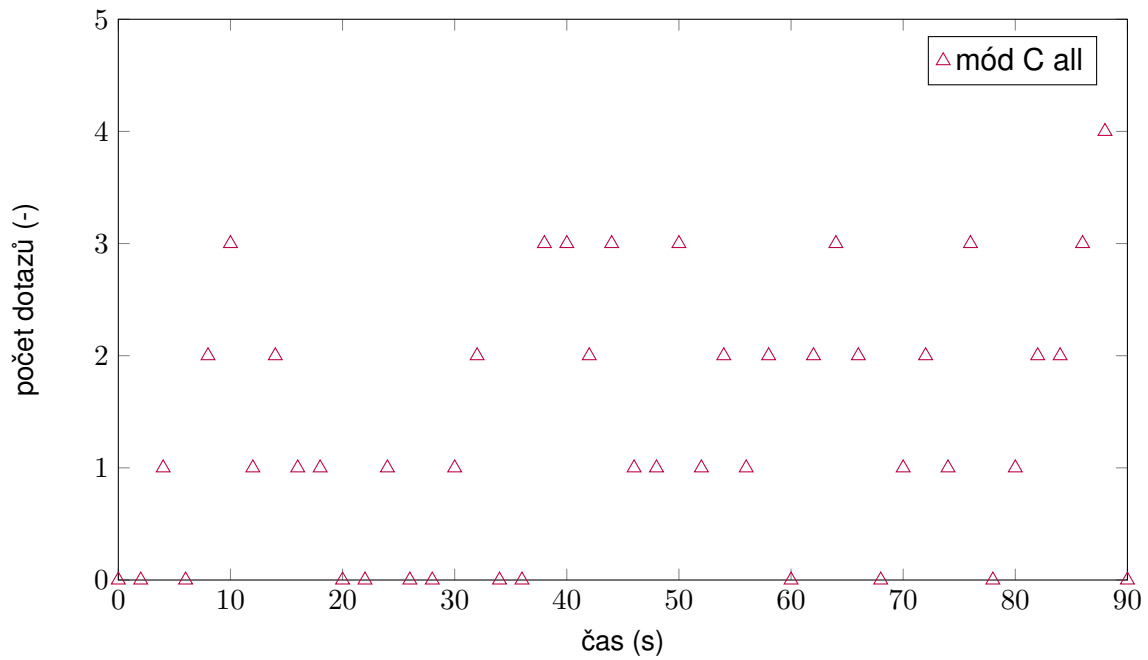
Obrázek 3.9: Počet dotazů mód A



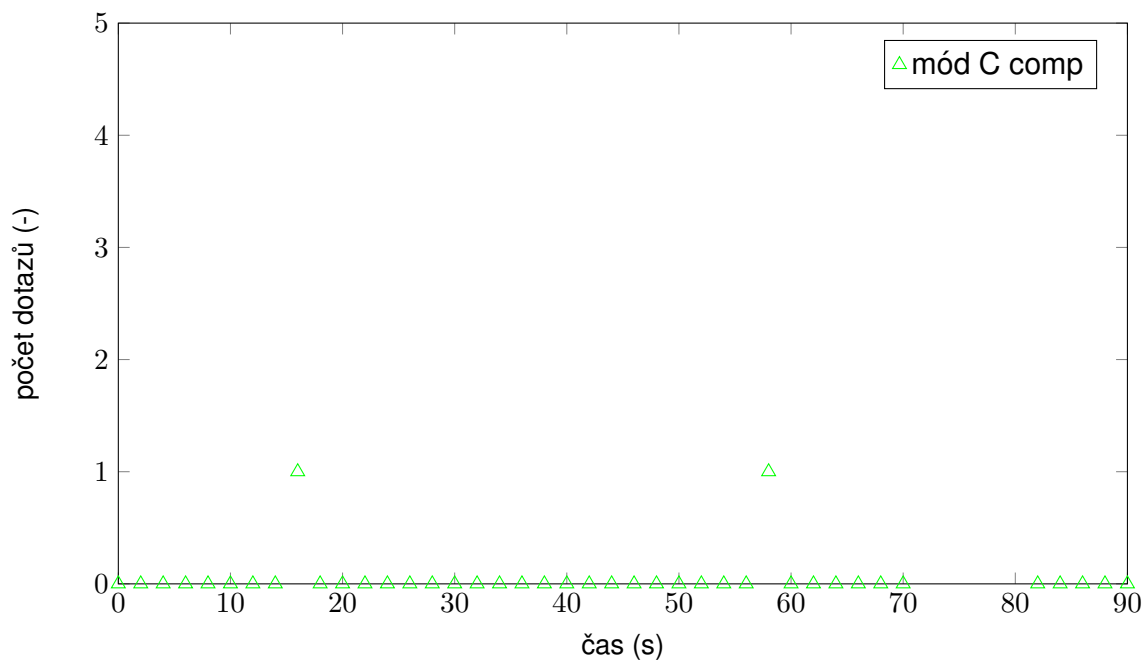
Obrázek 3.10: Počet dotazů mód C



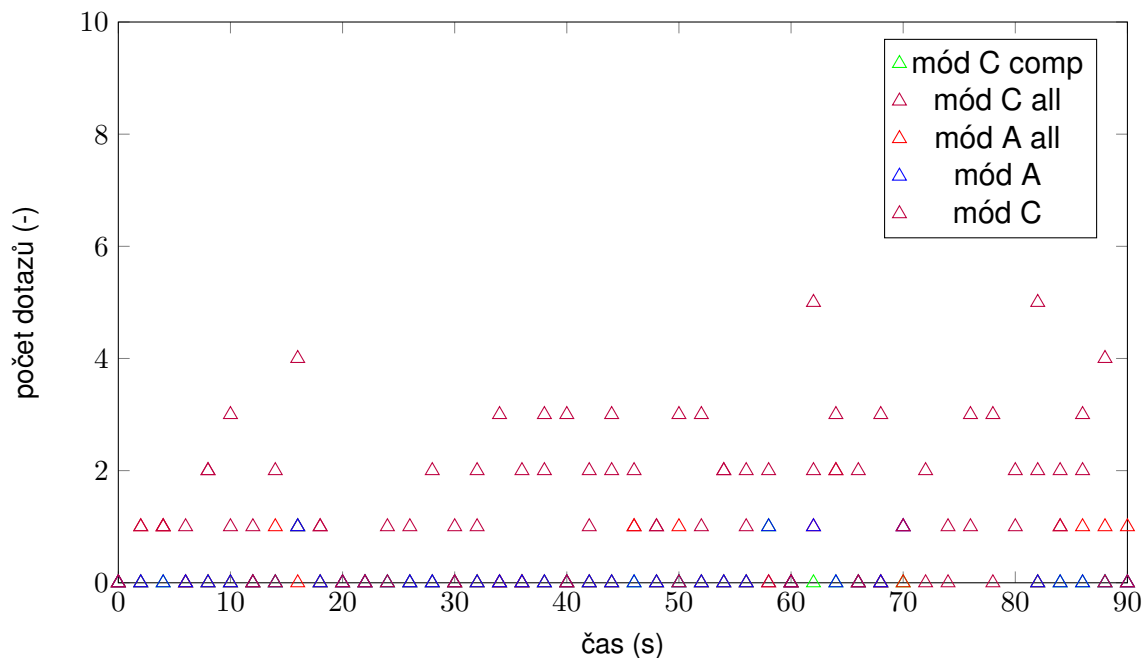
Obrázek 3.11: Počet dotazů mód A all



Obrázek 3.12: Počet dotazů mód C all



Obrázek 3.13: Počet dotazů mód A comp



Obrázek 3.14: Počet dotazů módů A,C

Tabulka 3.2: Výstup programu dump1030 měření 28.4.

Statistics of measured data with length of 85983232 bits:	
Messages recognized in total:	16856
Mode A messages recognized:	4
Mode C messages recognized:	60
Mode A All-Call messages recognized:	12
Mode C All-Call messages recognized:	63
Mode A All-Call (Compatibility Mode) messages recognized:	0
Mode C All-Call (Compatibility Mode) messages recognized:	2
Mode S messages recognized:	16715



3.2.2 30. 6. výsledky měření 1. let

Doplněný výstup z programu report_1030.py.

Spuštěný příkaz report_1030.py /media/karel/Samsung256/2023-06-30_1.iq.

Podmínky měření

Data ze souboru: 2023-06-30_1.iq

Ve složce: /media/karel/Samsung256

Vzorkovací frekvence (MHz): 2 500 000

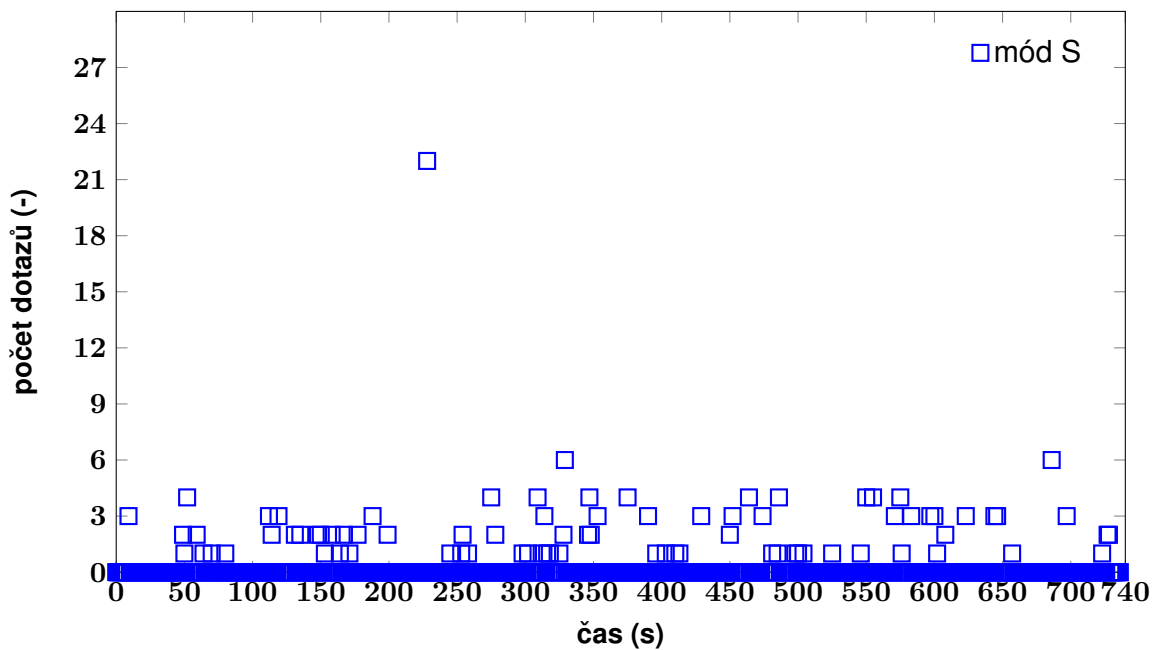
SDR rádio: RTL-SDR

Ostatní info: anténa 3dBi ADS-B 1090MHz SMA s koaxiálním kabelem RG-178 3 m

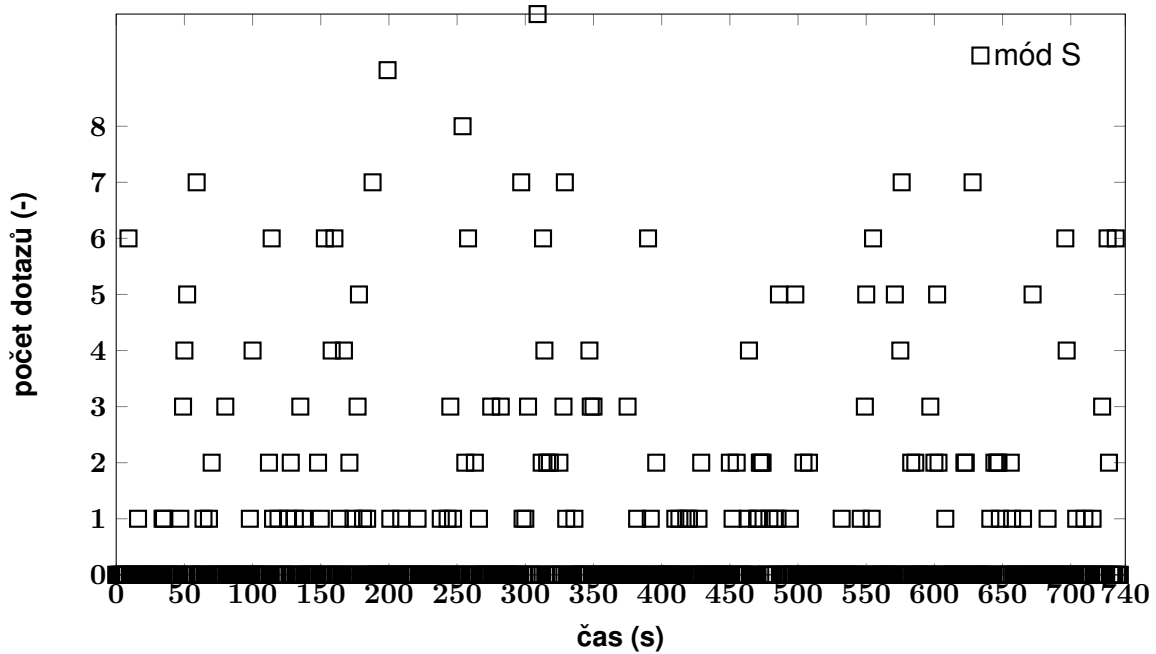
Datum a čas konce měření: 2023-06-30 11:55:38

Délka záznamu (hh:mm:ss): 00:12:17

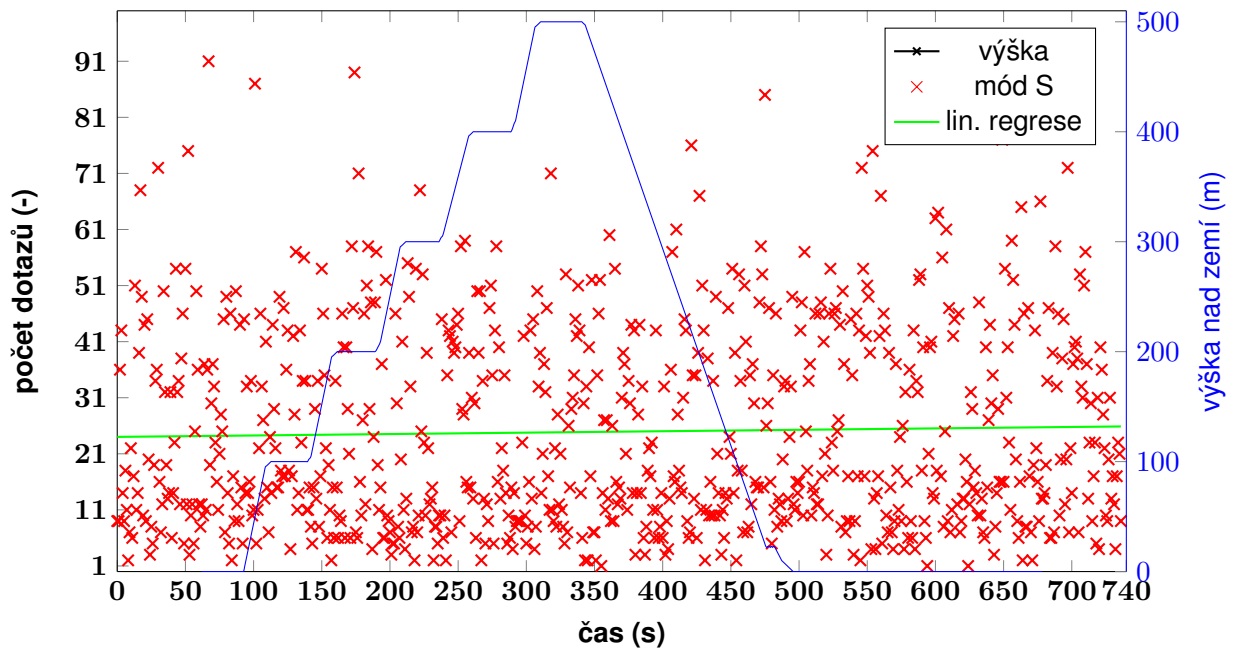
Výsledky



Obrázek 3.15: Počet dotazů mód A 30.6. 1. let



Obrázek 3.16: Počet dotazů mód C 30.6. 1. let



Obrázek 3.17: Počet dotazů mód S 30.6. 1. let

Korelační koeficient vymodelované výšky s počtem dotazů módu S $r = -0,052319800389041$.
 Záznam o velikosti 3 681 550 336 bajtů, při vzorkovací frekvenci 2,5 Msps a velikosti vzorků 2x 8 bitových



Tabulka 3.3: Výstup programu dump1030 30.6. 1. let

Statistics of measured data with lenght of 29 452 402 688 bits:	
Messages recognized in total:	18956
Mode A messages recognized:	199
Mode C messages recognized:	373
Mode S messages recognized:	18384

čísel. V souboru je 1 840 775 168 vzorků. Pomocí příkazu `stat 2023-06-30_1.iq` vyjdou údaje:

Birth 2023-06-30 11:43:21,690640910

Modify 2023-06-30 11:55:38,142919099

Rozdíl času 0:12:16.452279

To je 736,452279 sekund a vychází, že by mělo být v souboru uloženo 1 841 130 697 vzorků. Rozdíl činí 355 529 vzorků, odpovídá to časovému úseku 0,1422116 sekund.



3.2.3 30.6. výsledky měření 2. let

Doplněný výstup z programu report_1030.py.

Spuštěný příkaz `report_1030.py /media/karel/Samsung256/1030_2023-06-30_0.sigmf-data.`

Podmínky měření

Data ze souboru: 1030_2023-06-30_0.sigmf-data

Ve složce: /media/karel/Samsung256

Vzorkovací frekvence (MHz): 6 000 000

SDR rádio: Pluto SDR

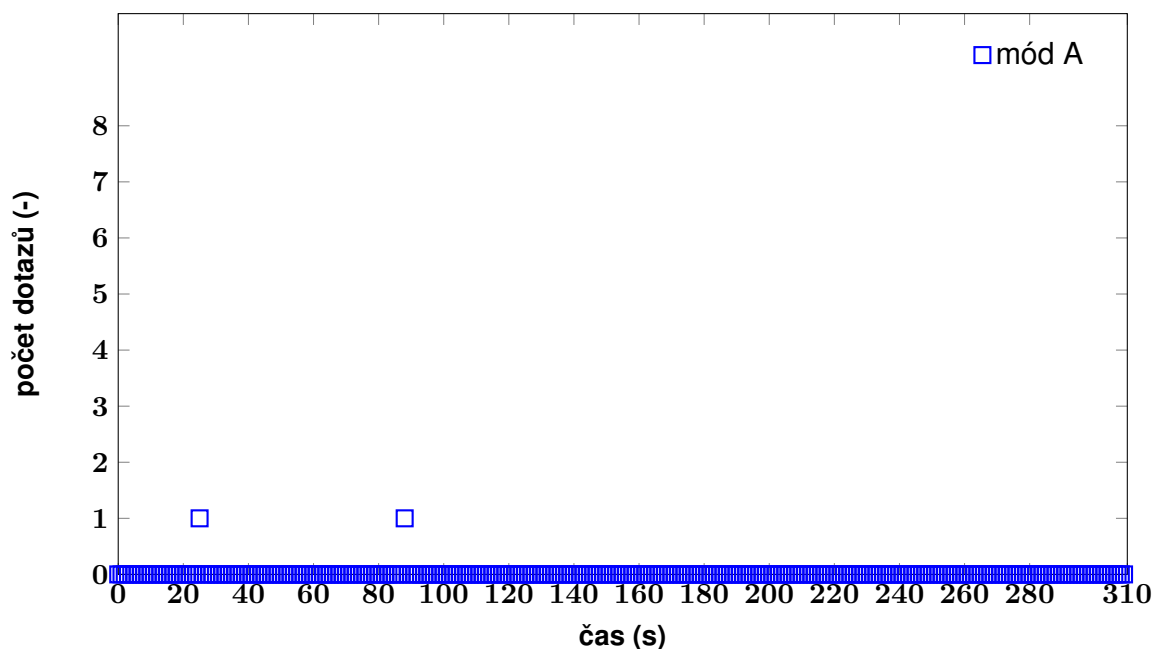
Ostatní info: anténa TED104-12, coax RG58 63,5 mm

Datum a čas konce měření: 2023-06-30 12:05:10

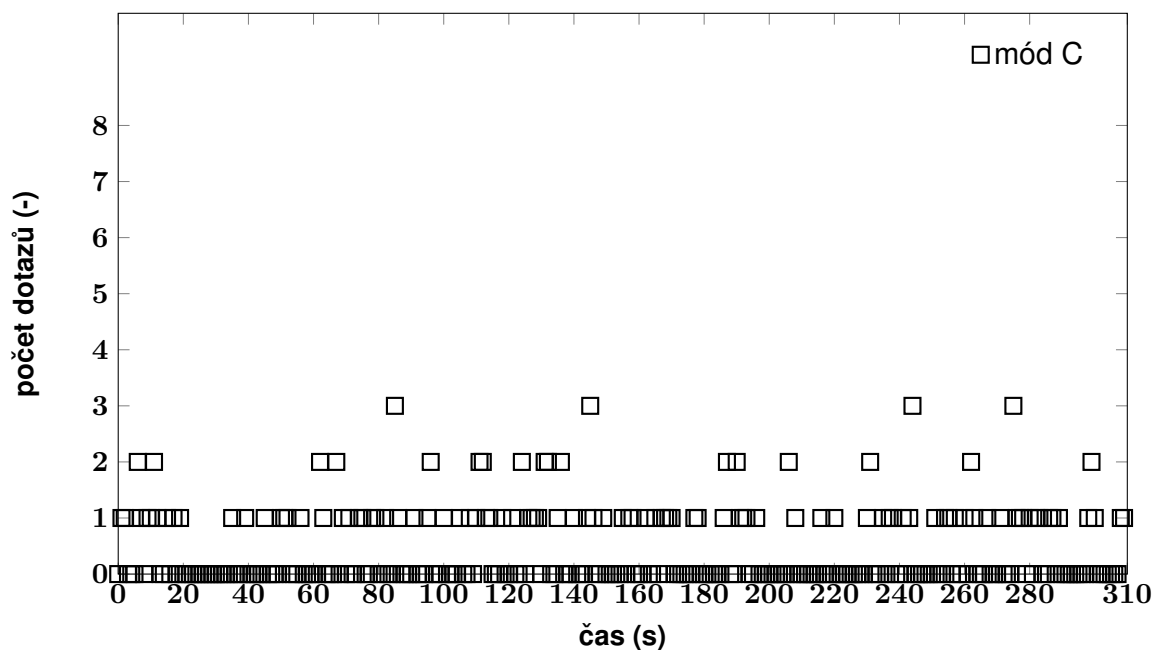
Délka záznamu (hh:mm:ss): 00:08:50

Velikost souboru (GB): 14,9

Výsledky

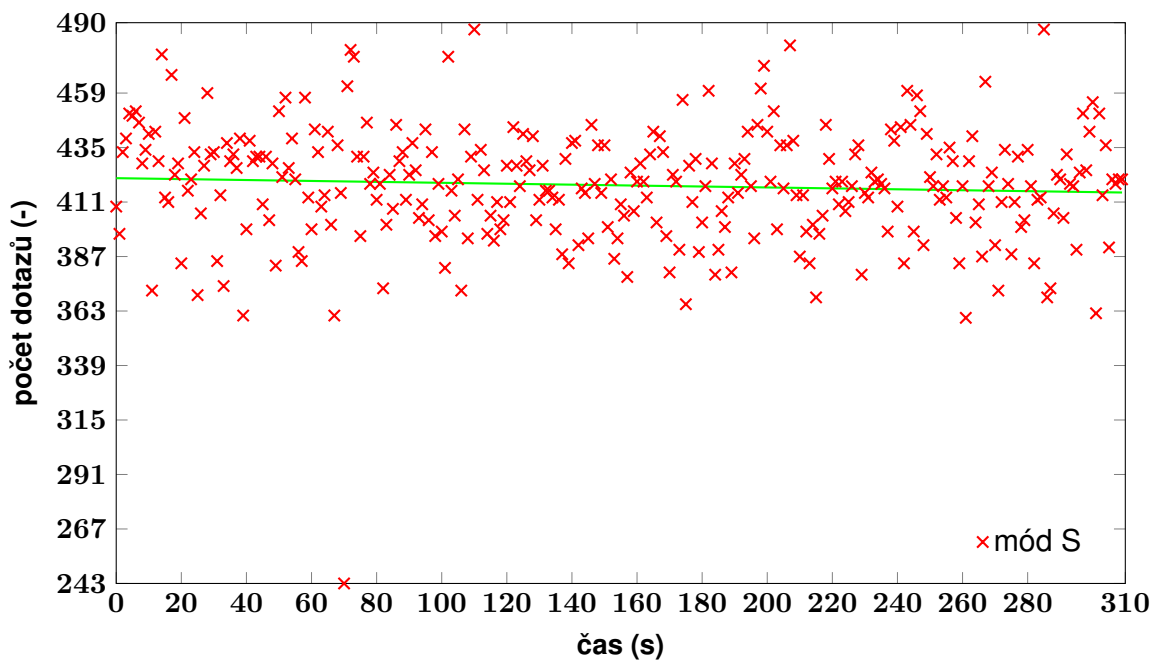


Obrázek 3.18: Počet dotazů mód A 30.6. 2. let



Obrázek 3.19: Počet dotazů mód C 30.6. 2. let

Časové značky souboru lze zjistit pomocí příkazu `stat 1030_2023-06-30_0.sigmf-data` a velikost souboru `wc -c 1030_2023-06-30_0.sigmf-data`. Soubor má velikost 14 859 370 496 bajtů,



Obrázek 3.20: Počet dotazů mód S 30.6. 2. let

to znamená 1 857 421 312 zaznamenaných vzorků při vzorkovací frekvenci 6 Msps, to odpovídá 309,6 sekund záznamu. Ale podle časových značek, záznam běžel 530 sekund a mělo být zaznamenáno 3 180 000 000 vzorků. Bylo zapsáno jen 58,41 % všech vzorků.

Tabulka 3.4: Výstup programu dump1030

Statistics of measured data with length of 118874963968 bits:	
Messages recognized in total:	129829
Mode A messages recognized:	2
Mode C messages recognized:	136
Mode S messages recognized:	129691



3.2.4 30.6. výsledky měření 3. let

Doplněný výstup z programu report_1030.py

Spuštěný příkaz report_1030.py /media/karel/Samsung256/1030_2023-06-30_2.sigmf-data

Podmínky měření

Data ze souboru: 1030_2023-06-30_2.sigmf-data

Ve složce: /media/karel/Samsung256

Vzorkovací frekvence (MHz): 6 000 000

SDR rádio: Pluto SDR

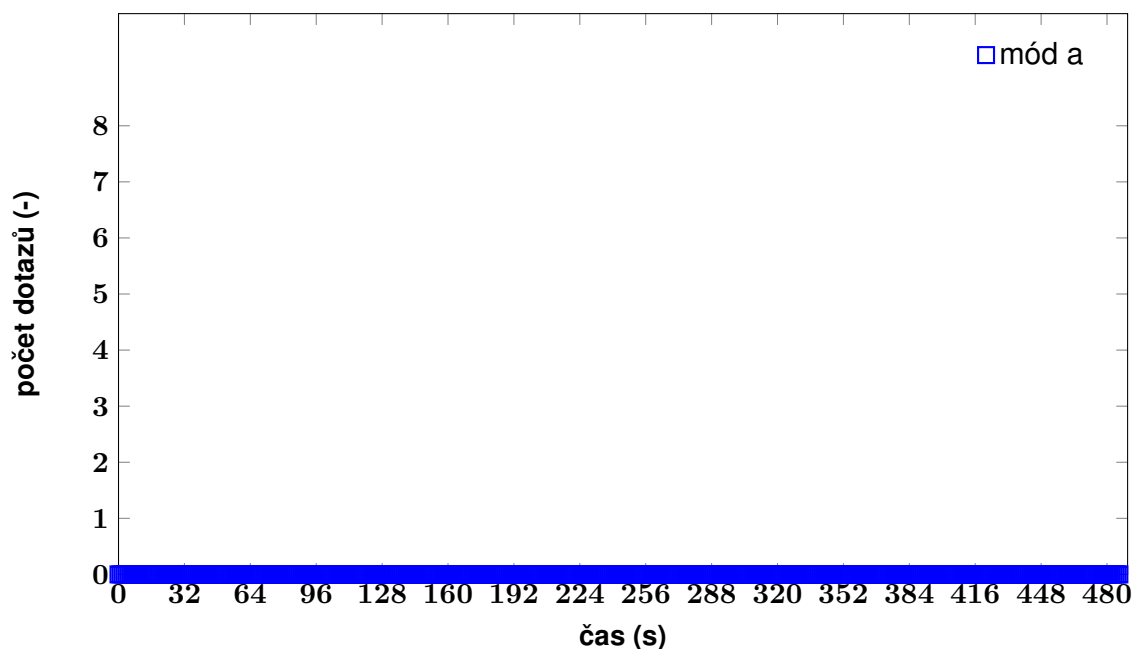
Ostatní info: anténa TED104-12, coax RG58 63,5 mm

Datum a čas konce měření: 2023-06-30 12:23:30

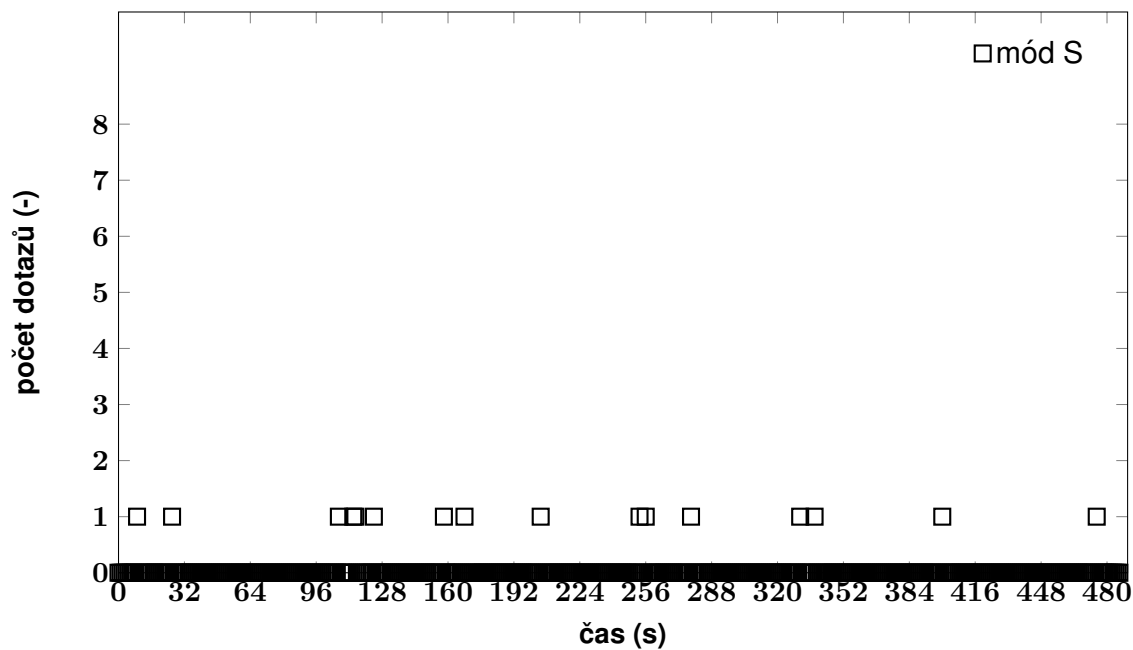
Délka záznamu (hh:mm:ss): 00:12:45

Velikost souboru (GB): 23,4

Výsledky



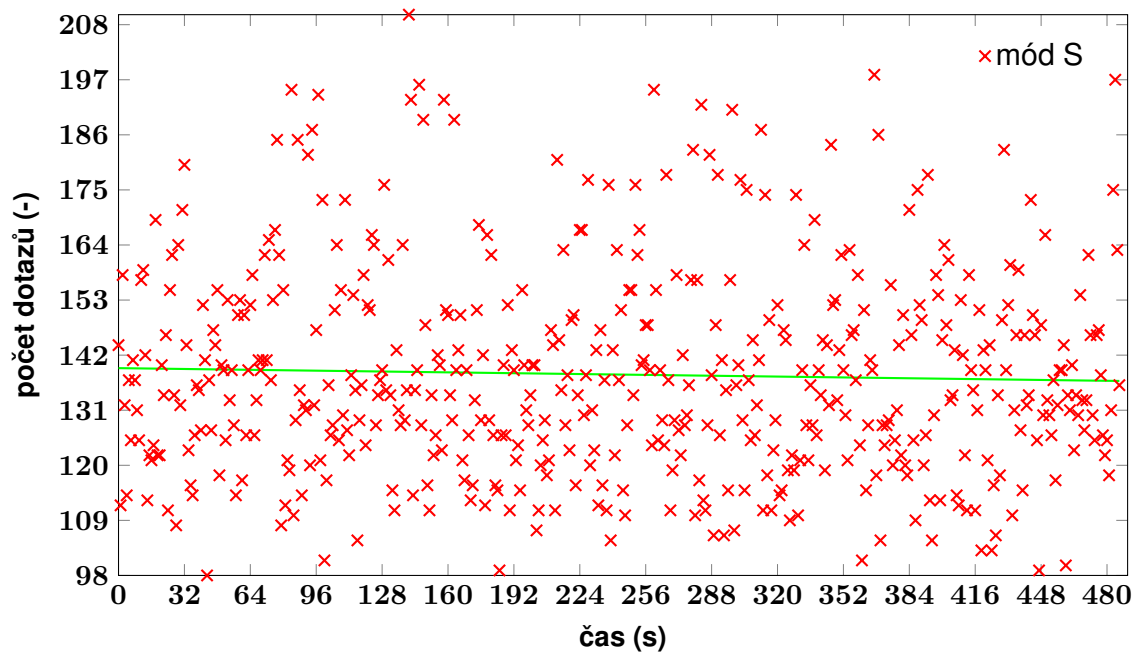
Obrázek 3.21: Počet dotazů mód A



Obrázek 3.22: Počet dotazů mód C

Zkouška s náhodnými vzorky

`rand_s_gen.py` s plnohodnotným standardním rozhraním příkazového řádku, které zachovává běžné konvence s nápovědou dostupnou pod příkazem `--help`. Všechny argumenty tohoto skriptu jsou volitelné a výchozí parametry vygenerují soubor s 506 vzorky datového typu `uint8`.



Obrázek 3.23: Počet dotazů mód S

Při vygenerování náhodných vzorků odpovídajícím 60 sekund při vzorkovací frekvenci 2,5 Msps. Příložením tohoto souboru na vstup programu dump1090 vyšlo 8534 zpráv S módu.

Tabulka 3.5: Výstup programu dump1030

Statistics of measured data with length of 186900283392 bits:	
Messages recognized in total:	67282
Mode A messages recognized:	0
Mode C messages recognized:	16
Mode S messages recognized:	67266



4 Diskuze výsledků

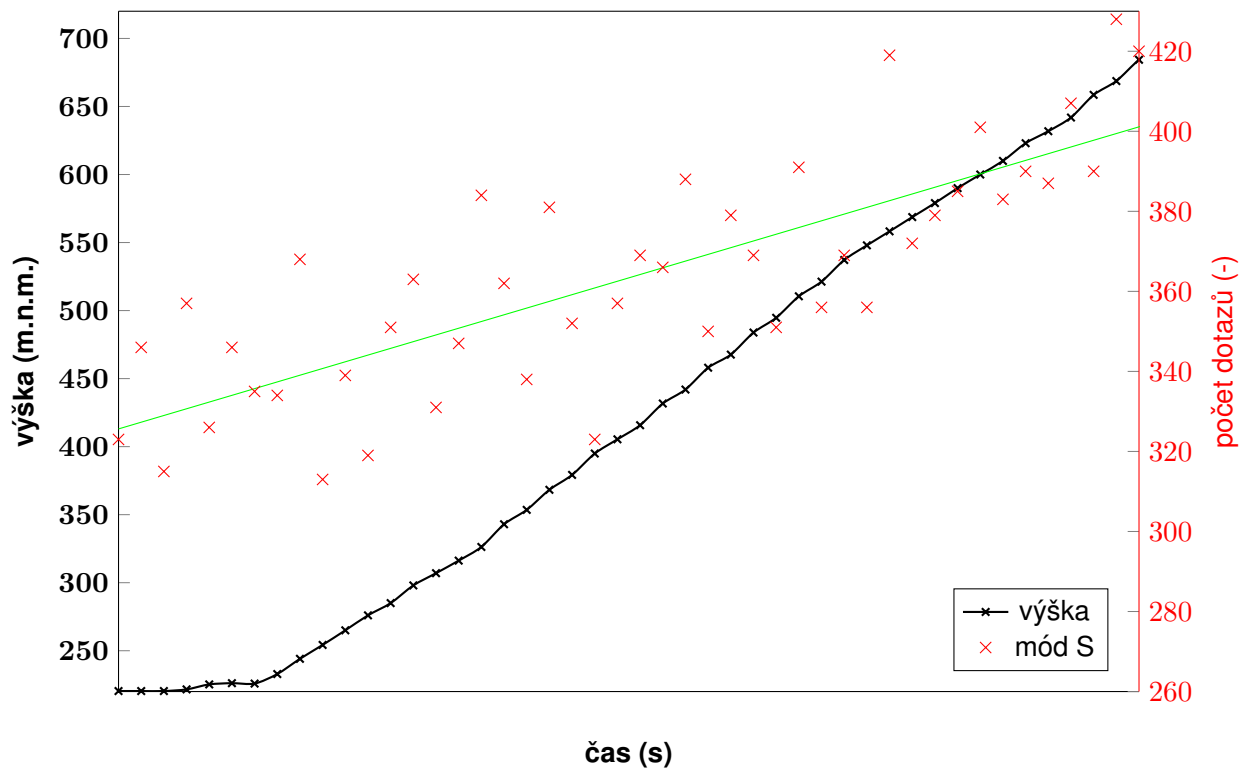
Vzhledem k relativní poloze místa měření a SSR Praha jak plyne z obrázků 4.3, 4.2. Není překvapivý příjem signálu a demodulování a dekodování dotazů hned od zapnutí záznamu.

Na obrázku 4.1 je kombinovaný graf s vykreslenou výškou letu a počtu dotazů módu S z výsledků měření 28.4. Vzhledem ke způsobu pořízení záznamu s nedefinovanými úseky bez dat. A vzhledem k tomu, že u ostatních záznamů nevyšel takto jasný trend považuji tyto výsledky za neúplné a nevyhovující.

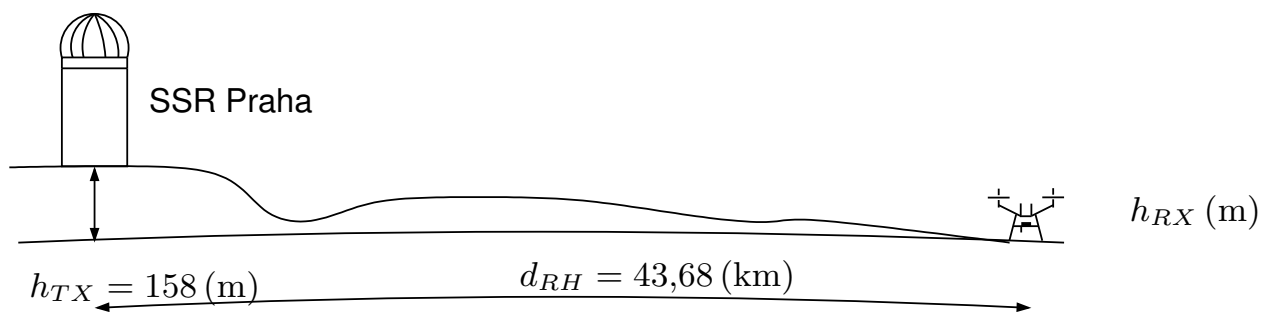
V mapě na obrázku 2.8 je červenou značkou vyznačeno místo měření a modrými značkami sekundární radary. Červený kruh o poloměru 95,8 km představuje rádiový horizont přijímače pro výšku 500 m, modrý kruh s poloměrem 128,9 km 1000 m a žlutý kruh s poloměrem 194,5 km 2500 m. V rámci měření se podařilo dosáhnout výšky 500 m. To znamená rádiový dosah 95,8 km. Je to maximální výška omezená ovládacím softwarem. Výstup dronu s měřícím zařízením jistě prospěl dosahu měření a není problémem sestavit hardware ze standardních hotových komponent takzvaně (COTS - Commercial Off-the-Shelf) a umístit jej na dron jako užitečné zatížení. O to větší pozornost by se měla věnovat pozornost výběru a správnému použití softwarovým prostředků.

Data pořízená pomocí grafů GNU radio a vygenerovanými spustitelnými soubory, vykazují neúplnosti. Díky datovému typu, který používají vzniká nadměrný datový tok a zřejmě dochází k zahození velkého množství dat.

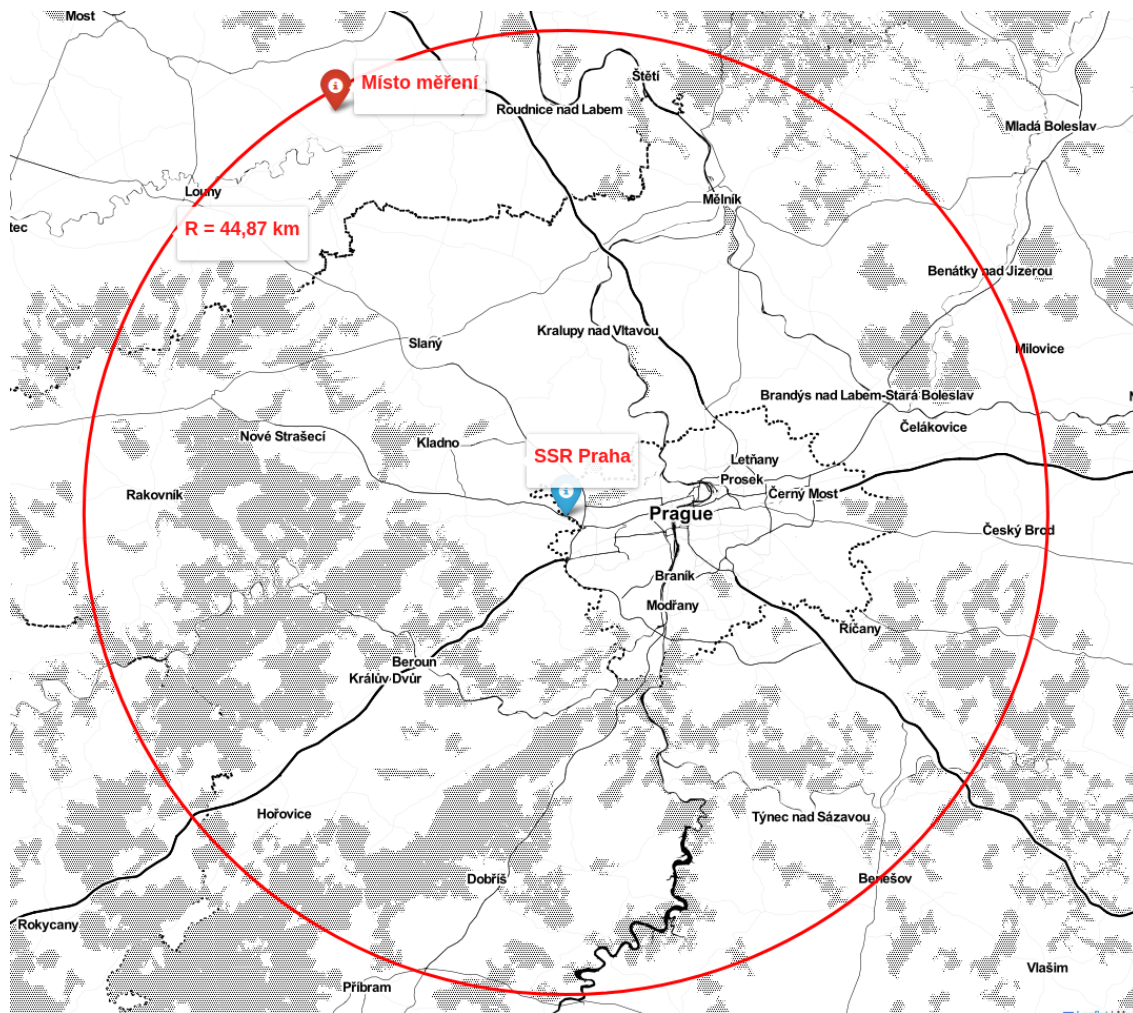
Z některých výsledků měření vyšlo neúměrně vysoké číslo dotazů. Zejména u měření při druhém letu z 30.6. průměrně kolem 415 dotazů módu S za sekundu. Z kvalifikace pomocí náhodných dotazů se ukázalo, že demodulace a dekodování nejsou tak dokonalé. Do vstupu programu jsem poslal náhodná data a jako výstup programu dump1030 bylo 142 detekovaných dotazů módu S za sekundu. Toto číslo se velmi blíží počtům dotazů z posledního měření dne 30.6. Nejlepší by bylo, odladit parametry dekodéru v živém módu s připojeným RTL-SDR a vystavit dekodér signálu, se známými parametry například z testeru odpovídačů iFR 6000. Bohužel se mi nepodařilo program v živém módu spustit.



Obrázek 4.1: Vykreslení průběhu stoupaní spolu s dotazy módu S



Obrázek 4.2: Rádiová viditelnost SSR Praha



Obrázek 4.3: Rádiová viditelnost SSR Praha



5 Závěr

Pro pravidelné a mimořádné monitorování frekvencí je nákladově nejlepší použít bezpilotní letový prostředek. Certifikovaná bezpilotní obletová laboratoř bude mít limit v přístupu do letového prostoru, a stále velmi nákladný provoz. Její přístrojové vybavení vychází z miniaturizovaných bloků používaných v letadlových laboratořích. Posouzení a vyhodnocení z takových systémů by mělo být ekvivalentní. Pomocí výukových a prototypovacích SDR se dají zachytit signály a vyhodnotit následně po letu podobná data jako u plnohodnotných certifikovaných systémů.

V průběhu práce jsem ověřil, že osadit dron DJI Matrice 600 Pro SDR přijímačem a zachytit signál je možné. Vytvořil jsem vlastní plošinu, kterou lze přepoužít v dalších projektech a osadit jiným užitečným zatížením. Výsledky v podobě zaznamenaného spektra signálu $1030 \text{ MHz} \pm 2 \text{ MHz}$. Ze signálu lze vyhodnotit počet dotazů SSR. Pro ověření konceptu jsou vhodné nástroje jako GNU radio a programovací jazyk python. Limitace v použití vybraných jazyků jsou v tom, že jde o vyšší programovací jazyk s vyššími režijními datovými toky. Výhodou je, že je čitelný a po krátké době lze alespoň omezeně pracovat na zpracování signálu. Pro prototypování a ověřování konceptů měření a vyhodnocení jsou SDR z pohledu ceny, rychlosti nasazení a konfigurovatelnosti a tím širokému spektru použití, pouze s výměnou anténové části.

Jako velký přínos vnímám standard pro záznam metadat o binárních souborech se zaznamenaným signálem. Umožňuje to snadněji sdílet data a vyhnout se znehodnocení ztrátou kontextu o datové sadě. Výsledný datový soubor je uložen spolu s metadaty a může být podroben jiné digitální analýze. Standard je také libovolně rozšiřitelný pokud uživatel shledá nutnost záznamu dalších parametrů.

Ke zpracování signálů v reálném čase je nejvhodnější použít programovací jazyky C, nebo použít nástroje pro generování kódu. Symulink, Matlab umožňuje generovat kód v C. K podobnému účelu je i nástroj v pythonu, jde o cython, který deklaruje datové typy stejně jako jazyk C a je rychlejší a efektivnější.

Navazující činnosti se mohou zaměřit na automatizaci celého procesu, jak záznamu dat tak i vyhodnocení. Automatizovat záznam automatickým inkrementálním pojmenováním souborů pomocí vlastního funkčního bloku v GNU radio. Spouštění záznamu a indikace zapisování dat. Vyhodnocení lze zefektivnit pospojováním skriptů a následného spouštění některého z open software dekodéru (dump1030, pyModes, opensky). Programům dump1030 a pyModes chybí možnost vstupu dat z SDR



rádía se vzorkovací frekvencí nad 4 Msps k umožnění dekódování zpráv vzestupného spoje. V případě pyModes zbývá napsat modul plutoreader.py a přidat volbu v argumentu příkazového řádku sdr rádía.



Seznam použité literatury

- [1] ITU. *Radio Regulations Articles*. Edition of 2020. WRC-95, 2020. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/pub/814b0c44-en>
- [2] *IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA: IEEE Standards Board, 2020. ISBN 978-1-5044-6349-2. Dostupné z: doi:10.1109/IEEESTD.2020.8999849
- [3] EASA. *Commission Implementing Regulation (EU) No 1207/2011 of 22 November 2011 laying down requirements for the performance and the interoperability of surveillance for the single European sky* [online]. 2022 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2011/1207/oj/eng
- [4] EUROCONTROL. *Guidelines on the Assessment of Ground-based Surveillance Interrogations* 2020. Dostupné z <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-guidelines-assessment-ground-based-surveillance-interrogations>
- [5] ICAO, *Doc 8071 Manual on Testing of Radio Navigation Aids* 2015 .Dostupné z <http://store1.icao.int/index.php/catalogsearch/result/?q=Doc+8071>
- [6] Český telekomunikační úřad *Plán přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka)* [online]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/narodni-kmitoctova-tabulka>
- [7] F. COLLINS, Travis, Robin GETZ, Di PU a Alexander M. WYGLINSKI. *Software Defined Radio for Engineers* Artech House, 2018. ISBN 978-1-63081-457-1. Dostupné také z: <https://www.analog.com/en/education/education-library/software-defined-radio-for-engineers.html>
- [8] PAGANO Thomas, John VAN DONGEN a Leo WAPELHORST. *Final Report on the Analysis of Data Collected During Flight Tests in the Northeast Corridor of the United States In July 2007 at 1030 MHz and 1090 MHz* [online]. FAA, 2010 [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <http://actlibrary.tc.faa.gov>



- [9] AIP, RLP. *Předpis L10/I, dodatek N LETOVÁ OVĚŘOVÁNÍ LETECKÝCH POZEMNÍCH ZAŘÍZENÍ (LPZ) 2015* Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10/L-10i/data/effective/dodN.pdf>
- [10] EUROCONTROL *Specification for European Mode S Station (EMS) 2021 Edition 4.0*
- [11] Hennerich Michael, *Controlling the transceiver and transferring data* 2021, Dostupné z: https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/controlling_the_transceiver_and_transferring_data
- [12] PAGANO Thomas, John VAN DONGEN a Leo WAPELHORST. *Results of DATAS Investigation og Illegal Mode S ID's at JFK Airport FAA, 1992* [cit. 2023-04-06] Dostupné z: <http://actlibrary.tc.faa.gov>
- [13] SCHÄFER Matthias, LENDERS Vincent, MARTINOVIC Ivan. *Experimental analysis of attacks on next generation air traffic communication*. In: International Conference on Applied Cryptography and Network Security. Springer; 2013
- [14] PAGANO Thomas, Leo WAPELHORST. *1030/1090 MEGAHERTZ SIGNAL ANALYSIS FRANKFURT, GERMANY FAA, 1995* [cit. 2023-03-06] Dostupné z: <http://actlibrary.tc.faa.gov>
- [15] CHLUDZINSKI, B.J., A.C. DRUMM, T.R. ELDER, W.H. HARMAN, G.S. HARRIS a A.D. PANKEN. *Lincoln Laboratory 1030/1090 MHz Monitoring* [online]. 2011. Lexington Massachusetts: FAA, 2011 [cit. 2023-06-01].
- [16] HONDA Junichi a OTSUZAMA Takuya. *Statistical Analysis of 1090 MHz Signals Measured During a Flight Experiment* Electronic Navigation Research Institute (ENRI), 2018 (online).
- [17] AIP, RLP. *Předpis L10 IV, O civilní letecké telekomunikační službě, svazek IV - přehledový a protisrážkový systém*, Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10iv/index.htm>
- [18] SUN, Junzi a Jacco M. HOEKSTRA. *Analyzing Aircraft Surveillance Signal Quality at the 1090 Megahertz Radio Frequency*. ICRAT, 2020. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Afd9913cb-7041-4606-a150-1eb073021de2>



- [19] POTIER Eric, MCKAY Stuart. *Monitoring Surveillance* NM User Forum EUROCONTROL. 2022 Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-02/eurocontrol-nm-user-forum-eric-portier-stuart-mckay.pdf>
- [20] The Signal Metadata Format (SigMF), 1.0.0, 29.11.2021, <https://sigmf.org>
- [21] *Matrice 600 Pro user manual*, Dostupné online; V1.0, 2018 Dostupné z: https%3A%2F%2Fdl.djicdn.com%2Fdownloads%2Fm600%2520pro%2F20180417%2FMatrice_600_Pro_User_Manual_v1.0_EN.pdf&usg=AOvVawOwSU881pYHxGIbg1a0To4H
- [22] *What is libiio?: Analog Devices Wiki* [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/libiio>
- [23] BNILAM, Noori, Dennis JOOSENS, Jan STECKEL a Maarten WEYN. *Low Cost AoA Unit for IoT Applications: Conference: 13th European Conference on Antennas and Propagation* [online]. 2019 [cit. 2023-05-11].
- [24] Lichtman, Marc *PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python*. Dostupné z: <https://pysdr.org/index.html>
- [25] L. Laaksosaari, H. Turtianen, S. Khandker and A. Costin, "dump1030: Open-Source Plug-and-Play Demodulator/Decoder for 1030 MHz Uplink," v *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 38, no. 7, pp. 46-57, 1 Červenec 2023, doi:10.1109/MAES.2023.3255844
- [26] DJI *Matrice 300 RTK specification*, dostupné online <https://enterprise.dji.com/matrice-300/specs>
- [27] M. Steve *Dokumentace librtlsdr*, dostupné online <https://github.com/steve-m/librtlsdr>
- [28] *SDR4 Engineers Online* <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf>
- [29] Gerald Youngblood *A Software-Defined Radio for the Masses* 2002
- [30] <https://www.phantomhelp.com/logviewer/upload/>
- [31] Karel Kédli, *GRABCAD COMMUNITY*: <https://grabcad.com/karel.kedl-1/models>



[32] DM4DS, *Thingiverse*: <https://www.thingiverse.com/thing:4181441>

[33] DJI Matrice 600 Pro <https://www.dji.com/cz/matrice600-pro/info>

[34] Bc. Jakub Šíma POKROČILÉ MAPOVÁNÍ PŘEHLEDOVÉ INFRASTRUKTURY ANALÝZOU SSR ODPOVĚDÍ OD LETADEL Diplomová práce POKROČILÉ MAPOVÁNÍ PŘEHLEDOVÉ INFRASTRUKTURY ANALÝZOU SSR ODPOVĚDÍ OD LETADEL



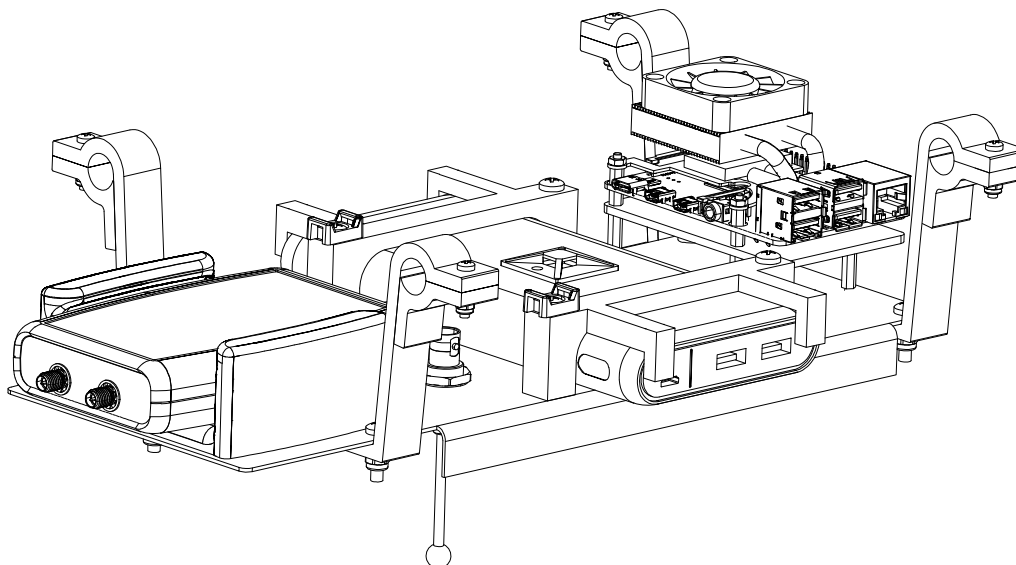
Přílohy

Tyto soubory jsou na přiloženém CD k práci.

CD

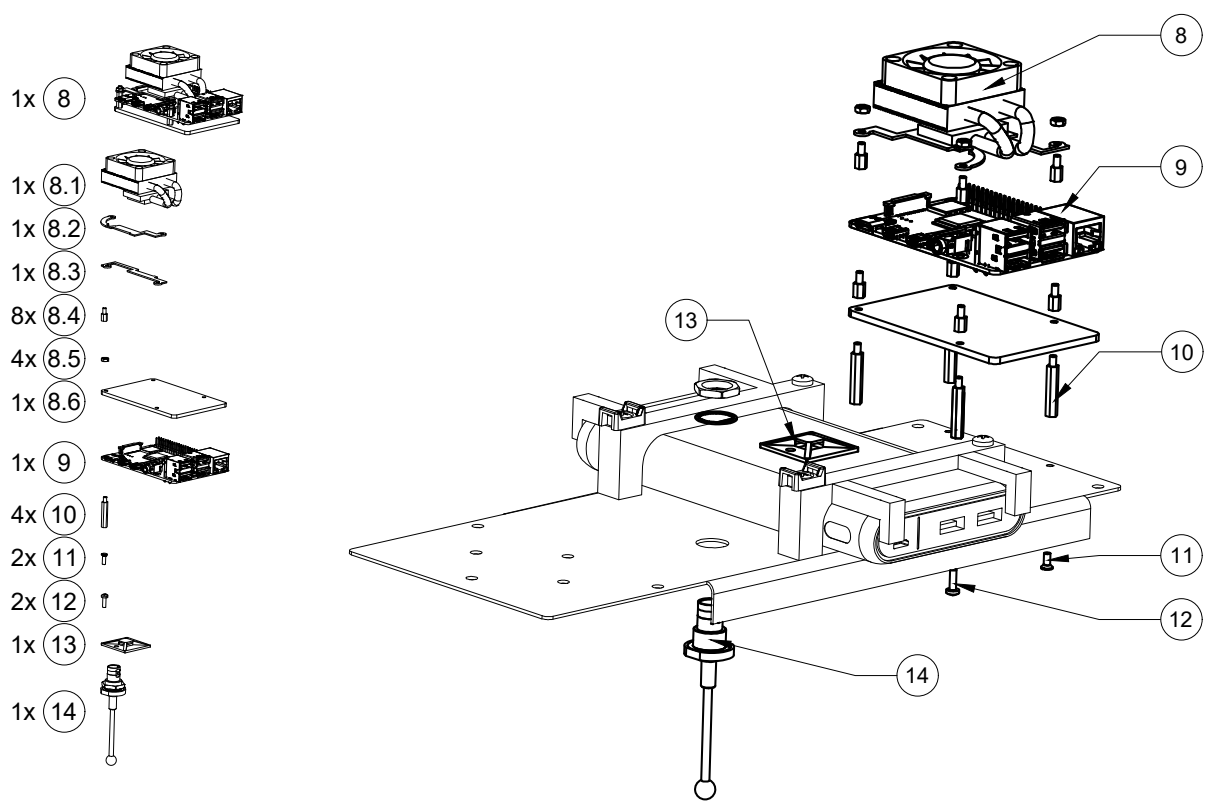
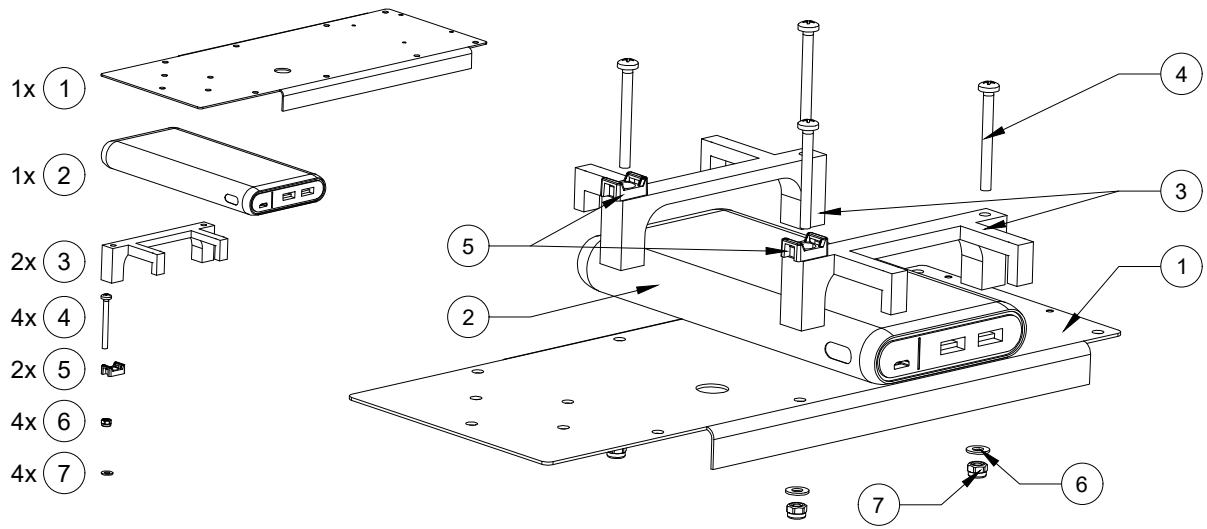
- report_1030
 - 1030_report.py
 - resampler.py
 - csv_reader.py
 - 1030_report_temp.tex
- GNU_radio
 - data-rec.grc
 - data-rec.py
 - data-pluto.grc
 - data-pluto.py
- rand_s_gen.py
- data_capture_pluto.py
- resample2sigmf.py
- DJIFlightRecord_2023-04-28_[19-19-37].kmz

Příloha 1 instrukce k sestavení



seznam materiálu			
položka	P/N	popis	počet
1	-	základna	1
2	a1274 ANKER	powerbanka	1
3	-	držák powerbanky	2
4	M4x40 ISO7045	M4x40 ISO7045	4
5	TM2S8-M	úchytka pro kabel	2
6	M4 ISO7089	matice samojistná	11
7	M4 DIN985	podložka	11
8	EP-0122	chladič	1
9	-	raspberry Pi 4B	1
10	M2,5 x 20	distanční sloupek	4
11	M2,5x6 ISO 2009	šroub	2
12	M2,5x6 ISO7045	šroub	2
13	151-28320	samolepící úchytka pro kabel	1

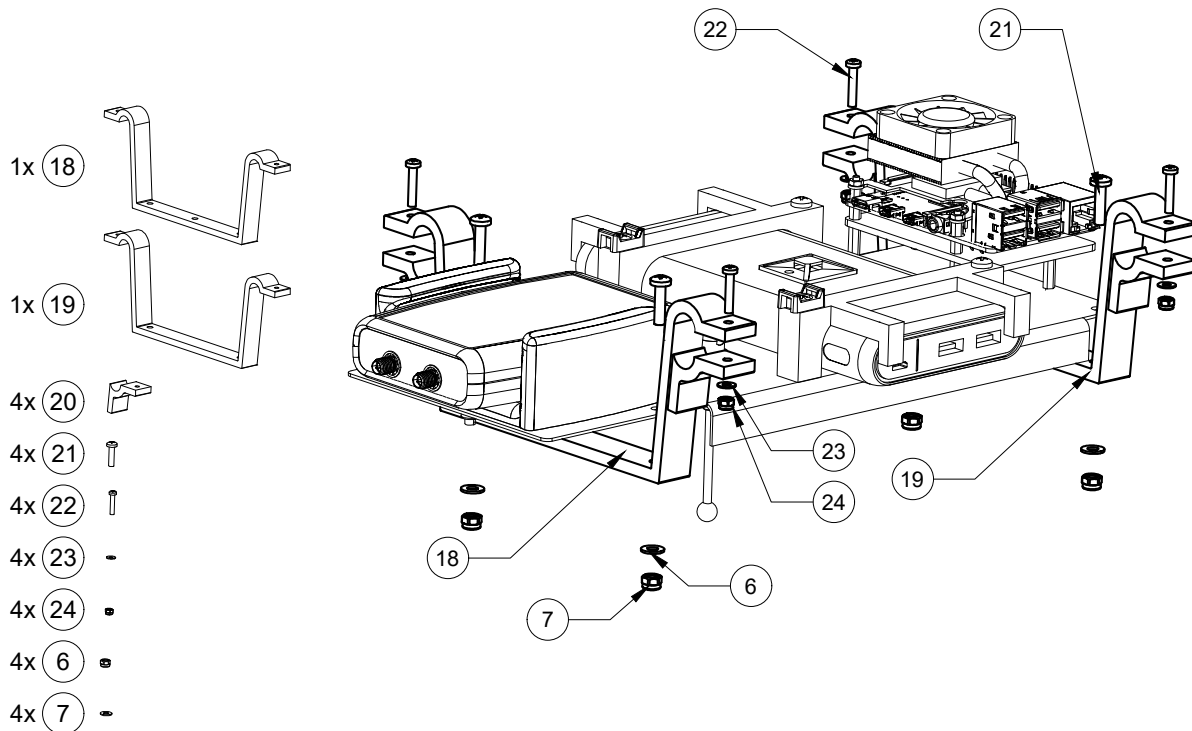
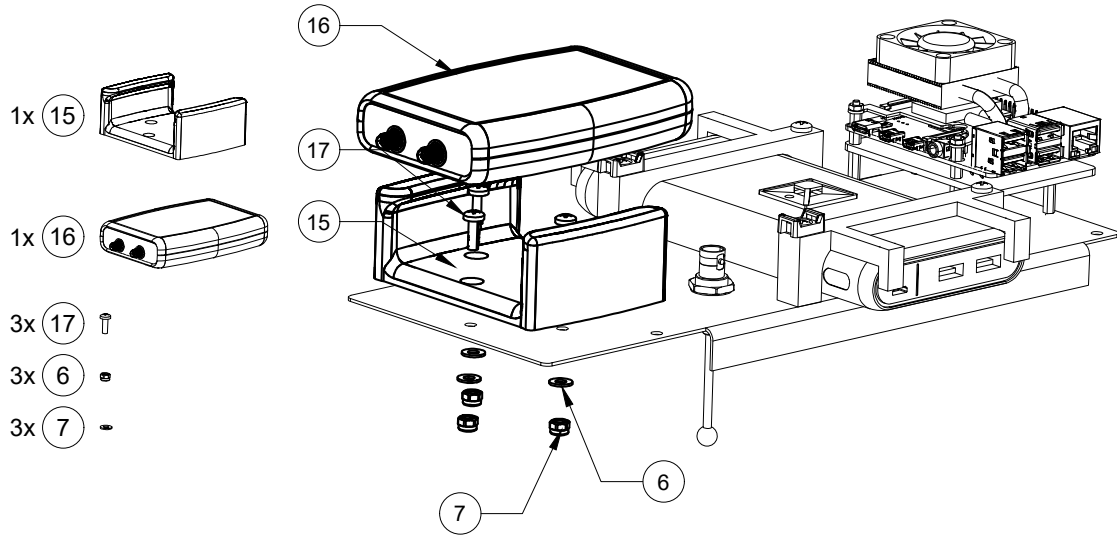
položka	P/N	popis	počet
14	TED 104-12	anténa	1
15	DM4DS Adalm Pluto Holder universal	držák Pluto SDR	1
16	-	Pluto SDR	1
17	M4x12 ISO7045	šroub	3
18	-	přední uchycení na M600 PRO	1
19	-	zadní uchycení na M600 PRO	1
20	-	objímka	4
21	M4x16 ISO7045	šroub	4
22	M3x16 ISO7045	šroub	4
23	M3 ISO7089	podložka	4
24	M3 DIN985	matice samojistná	4



- 1x (1)
- 1x (2)
- 2x (3)
- 4x (4)
- 2x (5)
- 4x (6)
- 4x (7)

- 1x (8)
- 1x (8.1)
- 1x (8.2)
- 1x (8.3)
- 8x (8.4)
- 4x (8.5)
- 1x (8.6)
- 1x (9)
- 4x (10)
- 2x (11)
- 2x (12)
- 1x (13)
- 1x (14)

Instrukce k sestavení 2



Instrukce k sestavení 3