



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Tomáš Tůma

**NÁVRH A REALIZACE VKV PŘIJÍMACÍHO SYSTÉMU
NA BÁZI SDR**

Bakalářská práce

2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Tomáš Tůma

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – TUL – Technologie údržby letadel

Název tématu (česky): **Návrh a realizace VKV přijímacího systému na bázi SDR**

Název tématu (anglicky): Design and Realization of VHF Receiving System Based on SDR

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Teorie rádiového přenosu na frekvenci VKV a rádiového příjmu pomocí SDR
- Analýza trhu s VKV a SDR přijímači
- Návrh systému
- Realizace systému
- Instalace systému



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Moise N. Solomon. Software Defined Radio: A System Engineering View of Platform Architecture and Market Diffusion. MIT, 2002
María Feuncisla Merino Artalejo. Market Impact of Software Radio: Benefits and Barriers. MIT, 2002
<https://www.rtl-sdr.com/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**
Ing. Martin Zach

Datum zadání bakalářské práce: **19. října 2018**
(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 bakalářské práce: **26. srpna 2019**
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



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Tomáš Tůma
jméno a podpis studenta

V Praze dne 19. října 2018

Poděkování

Velmi rád bych úvodem poděkoval vedoucím mé práce. Jmenovitě pak Ing. Martinu Zachovi za odborný dohled, za poskytnuté informace, za cenné rady a v neposlední řadě za velmi vstřícný přístup během psaní této práce. A panu Ing. Stanislavu Pleningerovi Ph.D. nejen za poskytnutí možnosti zpracovat tuto práci, ale rovněž za vědomosti, které mi jím byly předány během studia.

Také bych rád poděkoval své rodině, zejména oběma rodičům za vytvoření podmínek pro poklidné studium, za důvěru, za podporu, a především za jejich trpělivost. Všem blízkým přátelům, kteří mne podporovali po celé studium, patří rovněž vřelé díky. Závěrem bych rád poděkoval všem svým učitelům, kteří mi díky předání jejich znalostí umožnili dospět až sem, k napsání této práce.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a k obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

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).

V Praze dne 25. 8. 2019



.....
podpis autora (jméno a příjmení)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Návrh a realizace VKV přijímacího systému na bázi SDR

Bakalářská práce

Září 2019

Tomáš Tůma

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout, realizovat a instalovat přijímací systém založený na bázi SDR pro umožnění poslechu hlasové komunikace v letectví, která probíhá mezi pilotem a řídícím. Analyzovat dostupné hardwarové možnosti přijímačů a možná softwarová řešení. Na základě zjištěných informací navrhnout, realizovat a instalovat funkční přijímací systém.

Klíčová slova

Velmi krátké vlny, Softwarově definované rádio, RTL, Přijímač, Přijímací systém, Letecké pásmo, Návrh systému, Realizace systému, Hlasová komunikace v letectví.

Abstract

The aim of this thesis is to design, realize and install a receiver system based on SDR that would provide for listening of aviation voice communication between pilots and air traffic controllers. The thesis provides analysis of available hardware options of receivers and possible software solutions. Based on gathered information, a functional receiver system is designed, realized and installed.

Keywords

Very High Frequency, Software Defined Radio, RTL, Receiver, Receiving system, Airband, System design, System realization, Voice communication in aviation.

Obsah

Seznam zkratek	7
1. Úvod	9
2. Historie a teorie RTL-SDR	10
2.1 Elektromagnetické vlnění	10
2.1.1 Šíření elektromagnetického vlnění	11
2.1.2 Rozdělení elektromagnetických vln	11
2.2 Historie radiového vysílání	12
2.2.1 Historie leteckých frekvencí	12
2.2.2 Současnost	13
2.2.3 Budoucnost	14
2.3 Amplitudová modulace DSB	15
2.4 Realizace VKV přenosu	17
2.5 Princip funkce softwarově definovaného rádia – SDR	17
2.6 SDR za pomoci RTL	18
3. Analýza trhu s VKV a SDR přijímači	19
3.1 FUNcube Dongle Pro+	19
3.2 SDR Play RSP2	20
3.3 Airspy R2	21
3.4 Airspy mini	22
3.5 HackRF One	22
3.6 LimeSDR mini	24
3.7 RTL-SDR V3	24
3.8 DVB-T tuner	25
3.9 Závěrečné zhodnocení přijímačů	25
3.10 Antény	27
3.10.1 Diamond D-777	27
3.10.2 AOR DA-3200	28
3.10.3 Diamond D-130	29

3.10.4 Sirio GP 108-136 LB/UHV.....	29
3.10.5 SCAN WBA-20.....	29
4. Návrh systému.....	30
4.1 Vybraný hardware přijímací stanice.....	30
4.1.1 Raspberry Pi 3 B+.....	31
4.1.2 Raspberry Pi4.....	31
4.1.3 Zvolený anténní systém.....	32
4.2 Navrhovaný software.....	32
5. Realizace systému.....	41
5.1 Přípravná fáze Raspberry.....	41
5.2 Instalace gitu pro RTL-SDR.....	42
5.3 Použití OpenWeb RX.....	43
5.4 Nastavení web serveru OpenWebRX.....	44
5.4.1 Nastavení připojení.....	44
5.4.2 Nastavení uživatelského rozhraní.....	45
5.4.3 Nastavení přijímače.....	45
5.5 Instalace systému.....	48
5.5.1 Místo instalace.....	48
5.5.2 Umístění antény.....	48
5.5.3 Uložení přijímací stanice.....	48
6. Závěr.....	50
Seznam literatury.....	53
Seznam obrázků.....	56
Seznam tabulek.....	58

Seznam zkratek

A/D	Analog to Digital signal – Analogový na Digitální signál
ADS-B	Automatic dependent surveillance – broadcast – Automatický závislý přehledový systém – vysílání
AM	Amplitude Modulation – Amplitudová Modulace
APP	Approach – Přiblížení
ATIS	Automatic Terminal Information Service – Automatická informační služba v koncové řízené oblasti
B	Vektor magnetické indukce
BNC	Bayonet Neil Concelman connector - Bajonetový konektor používaný pro koaxiální kabely
ČR	Česká republika
ČVUT	České Vysoké Učení Technické v Praze
DSB	Double Sideband – Modulace s dvěma postranními pásmy
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial – Standard digitálního televizního vysílání
E	Vektor intenzity elektrického pole
FAA	Federal Aviation Administration – Státní letecký úřad Spojených států amerických.
FM	Frequency Modulation – Frekvenční modulace
FREQ	Frequency – Frekvence
GPS	Global Positioning System – Globální polohovací systém
GSM	Global System for Mobile communications
HDMI	High-definition Multi-media Interface – Technologie pro přenos nekomprimovaného obrazového a zvukového signálu.
HW	Hardware
HZS	Hasičský záchranný sbor
ICAO	International Civil Aviation Organization - Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IP	Internet Protocol – Internetový protokol
IQ	Kvadrurní složky modulace
KV	Krátké vlny
LCD	Liquid Crystal Display – Displej z tekutých krystalů
LKPR	Letiště Václava Halva Praha
MCX	Micro Coaxial Connector – Mikro koaxiální konektor
MSPS	Milion Samples per Second – Milion vzorků za vteřinu
OS	Operating System – Operační systém

PC	Personal Computer – Osobní počítač
RTL	Typ čipu společnosti Realtek
SD	Secure Digital – Typ paměťové karty
SDR	Software Defined Radio – Softwarově definované rádio
SMA	Subminiatur version A – Typ koaxiálního konektoru
SSH	Secure Shell – Zabezpečený protokol
TCP	Transmitssion Control Protocol – Transportní vrstva protokolů internetu
TWR	Tower – Věž
UDP	User Datagram Protocol – Uživatelský protokol pro přenos datagramů
ULD	Ústav Letecké Dopravy
URL	Uniform Resource Locator – Přesná identifikace umístění
USA	United States of America – Spojené státy americké
USB	Universal Serial Bus – Univerzální sériová sběrnice
VHF	Very High Frequency – Velmi vysoká frekvence
VKV	Velmi krátké vlny
Wi-Fi	Bezdrátová technologie připojení
WWW	World Wide Web – Celosvětový web

1. Úvod

Oblast řízení letového provozu a konkrétně hlasová komunikace mezi pilotem a řídícím je okruhem velmi zajímavým. Motivací pro sepsání této práce je pak především zájem do tohoto spektra činnosti více proniknout a vytvořit tak přijímací systém, který bude podložen zjištěnými poznatky. Dalším faktorem je i to, že zde lze propojit teoreticky získané znalosti s těmi praktickými. Celá práce by tak měla sloužit jako vhled do této problematiky a krok po kroku probrat body, které jsou nezbytně nutné pro realizaci systému, který dovolí hlasovou komunikaci poslouchat.

Druhá kapitola práce je věnována teorii elektromagnetického vlnění, radiového vysílání se zaměřením na oblast, ve které je hlasová komunikace prováděna. Jsou zde rozebrány principy zpracování dat za pomoci softwarově definovaného rádia a s tím i možnost využití zařízení jako přijímače s původně jiným primárním účelem.

Třetí kapitola je podrobněji zaměřena na zařízení, která se dají k příjmu signálů použít. Jsou zde analyzovány jak výkonnostní parametry přijímačů, tak i náklady na jejich pořízení a celkově jsou následně porovnány s realizovanou variantou. K příjmu signálu však nelze použít pouze přijímač, proto je zde uvedeno stejné srovnání i v případě antén, které je možné k účelům příjmu leteckého pásma použít.

Čtvrtá kapitola práce je následně zaměřena na návrh softwarového řešení přijímacího systému. V její první části je představeno hardwarové vybavení proto, aby bylo možné instalovaný software co nejlépe přizpůsobit. Druhá část pak má za cíl představit všechna možná softwarová řešení, aby dodala uživateli přehled, jakými způsoby lze poslech letecké komunikace provádět vzhledem k jeho očekáváním a požadavkům.

Pátá kapitola práce je zaměřena na konkrétní instalaci vybraného softwaru na zařízení, která jsou pro realizaci k dispozici. Jeho instalace je zde podrobně krok za krokem rozepsána včetně instalace podpůrných programů. Je zde popsán i způsob jakým se zařízení ovládá a uvedeno i konkrétní nastavení, které je použito pro finální instalaci. Ta je zde rovněž popsána, včetně zvoleného místa a provedeného způsobu.

V závěru je vyhodnocen výkon takto sestaveného přijímacího systému. Jsou zde popsány výhody i nedostatky zvolené realizace. K popsaným nedostatkům jsou navrženy způsoby, jakými lze vzniklé nedostatky řešit a co by pro jejich vyřešení bylo potřeba udělat. Shrnuty jsou zde i způsoby jakými lze, či jak by bylo možné, takto realizovaný přijímací systém využívat.

2. Historie a teorie RTL-SDR

V této teoretické části jsou vysvětleny nutné elementární pojmy a definice, které jsou potřebné pro úvodní orientaci v dané problematice, a jelikož je oblast velmi krátkých vln (dále jen VKV) pouze úzkou podoblastí spektra elektromagnetického vlnění, je nutné předem specifikovat a definovat, co vlastně elektromagnetické vlnění znamená a představuje a jak velkou část v ní zaujímá právě oblast VKV. Dále pak upřesnit, jaké frekvence se v letectví používají a jaká část je zprostředkována právě s jejich pomocí, s přihlédnutím k možnostem realizace samotného radiového přenosu vedoucímu až k úspěšné komunikaci a následně, jaké jsou možnosti příjmu a vysílání tohoto signálu. A v neposlední řadě, jak se přijímaný signál může efektivně zpracovat s použitím SDR – Softwarově definovaného rádia.

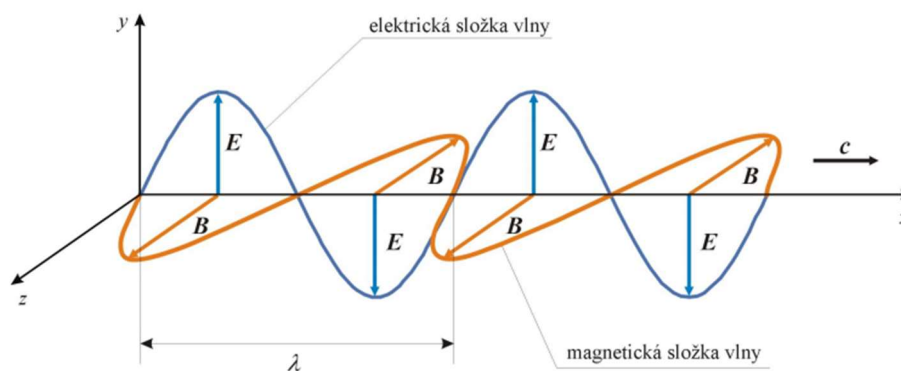
Cílem této úvodní části je objasnění podstaty hlasové komunikace v oblasti VKV, její provádění a zpracování s ohledem na zaměření bakalářské práce.

2.1 Elektromagnetické vlnění

Podstata elektromagnetického vlnění je zmíněna, protože radiový přenos, přesněji každá radiová vlna, je vlnou elektromagnetickou. Elektromagnetickým vlněním je nazýván jev, který probíhá v elektromagnetickém poli a jehož změny se šíří prostorem. Za pomoci tohoto vlnění je možné přenést informaci tím, že se mění parametry elektromagnetického vlnění. Z fyzikálního hlediska má elektromagnetická vlna dvě na sebe kolmé složky, ze kterých je složena a které jsou rovněž kolmé i na směr šíření vlny. Jsou to:

- E – intenzita elektrického pole
- B – vektor magnetické indukce

Směrování těchto vektorů pak docílíme polarizací, což je další významný jev, který se u elektromagnetického vlnění může provádět. Pro ilustraci slouží obrázek 1. [16]



Obrázek 1: Elektromagnetická vlna (zdroj: převzato z [14]).

2.1.1 Šíření elektromagnetického vlnění

Šíření elektromagnetických vln je popsáno a definováno složitou diferenciální rovnicí. Rovněž tak jevy nastávající během jejich šíření, jako jsou odraz, lom, interference atd., by byly tak tematicky široké a obsáhlé, že by se na ostatní důležité aspekty v této práci nenašel prostor, a proto jsou zde uvedeny pouze pojmy, které je bezpodmínečně nutné zmínit jakožto fundamentální. [2]

K určení oblasti VKV je důležité vysvětlit dvě veličiny, kterými jsou vlnová délka a frekvence.

Frekvence – je počet kmitů za 1 sekundu, uvádíme ji v Hertzích (Hz).

Vlnová délka – je vzdálenost, kterou urazí vlna za dobu jedné periody (jednoho kmitu).

Obě spolu souvisejí tak, jak je uvedeno v následujícím vztahu:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

Aby bylo dále možné z tohoto vzorce jednoduše zjistit frekvenci či vlnovou délku, je třeba znát rychlost šíření vln prostorem, která je dána tímto obecným vztahem:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.2)$$

Z něhož následně vyplývá, že rychlost a schopnost šíření vlny závisí na prostředí a jelikož se radiové vysílání provádí v oblasti vzduchu, což je z hlediska rychlost šíření vlnění oblast velice podobná oblasti vakua, bude uvažována rychlost šíření vln $v = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Po použití těchto vzorců pak není problém zjistit frekvenci, či vlnovou délku daného záření. [16]

2.1.2 Rozdělení elektromagnetických vln

V následující tabulce 1 je zastoupeno celé spektrum elektromagnetického záření. Tabulka je zde uvedena pro představu, aby bylo zcela zřejmé, kam oblast VKV přesně zařadit. Ze znázornění je patrné, že vlnová délka se v této oblasti pohybuje v řádech centimetrů až desítek metrů. Nejčastěji se však v praxi používá vysílání s vlnovou délkou mezi 1–10 metry. S použitím výše uvedeného vzorce lze tak zjistit, že to teoreticky znamená rozmezí frekvencí mezi 30 MHz až 3 GHz. [16]

Tabulka 1: Spektrum elektromagnetických vln (zdroj: převzato z [16]).

Vlnová délka	Druh záření
$10^4 - 10^2$ m	rozhlasové vlny (dlouhé, krátké, střední)
$10 - 10^{-2}$ m	televizní a rozhlasové vlny VKV
$10^{-1} - 10^{-4}$ m	mikrovlnné záření
$10^{-4} - 10^{-6}$ m	infračervené záření
$10^{-6} - 10^{-7}$ m	světlo
$10^{-7} - 10^{-9}$ m	ultrafialové záření
$10^{-9} - 10^{-12}$ m	rentgenové záření
$10^{-12} - 10^{-14}$ m	záření gama

Nyní by mělo být zcela zřejmé, o jakou oblast spektra elektromagnetického záření se jedná, a je tak možné se blíže zaměřit na oblast realizace radiového přenosu v letectví.

2.2 Historie radiového vysílání

Historii radiového přenosu můžeme vysledovat až do první poloviny 19. století, kdy Samuel F. B. Morse, jako průkopník elektromagnetické telegrafie, úspěšně uskutečnil první přenos informace, avšak pouze jako přenos elektrických impulzů. Následně po něm byl jako první schopen distribuce analogového signálu až v roce 1876 Alexander G. Bell. Nicméně, ani u jednoho z výše jmenovaných se nejednalo o radiový přenos, tak jak je to dnes běžné - čili šířený vzduchem. Toto experimentálně dokázal až Heinrich R. Hertz ke konci 19. století, kdy se dá říci, že svým počínáním navázal na teoretickou myšlenku J. C. Maxwella o možnosti takového přenosu informace. Postupným následným vývojem této technologie se dostáváme až do dnešní doby, kdy je přenos informací prostřednictvím signálu naprosto běžnou záležitostí. Popisovat další vývoj telekomunikace z obecného hlediska by v tomto bodě bylo bezpředmětné. Proto se zaměříme přímo na další vývoj VKV vysílání v letectví po roce 1900 až do současnosti. [16]

2.2.1 Historie leteckých frekvencí

Několik let po H. R. Hertzovi, a to konkrétně v roce 1917 se úspěšně realizuje přenos signálu mezi vzduchem a zemí, a pochopitelně i opačně. Nutno podotknout, že to znamená významnou revoluci v letecké komunikaci, která do této doby byla prováděna pouze prostřednictvím vizuálních signálů. K jejich postupnému vytlačení však dochází až o několik let později, kdy se samotná instalace postupně stává snáze technologicky proveditelnější a dostupnější. V počátku se ovšem nejednalo o VKV jako dnes, ale pouze o KV, neboli o krátké vlny, které byly používány v rozsahu 3 - 30 MHz a v porovnání s dnešní dobou byly tyto přenosy značně nespolehlivé. S tím, jak posléze rostly požadavky na spolehlivost spojení, se

přirozeně přechází už k nám známému vysílání VKV. Další významný posun v této oblasti lze zaznamenat po druhé světové válce, kdy technologický pokrok a vývoj umožnily cestování na delší vzdálenosti a zároveň se jedná o počátek stále více dostupné a rozvíjející se komerční letecké přepravy cestujících. Získané poznatky způsobily nárůst objemu dopravy a bylo nutné začít narůstající provoz organizovat a řídit. O to se měl postarat vznik organizace ICAO společně s přidělením rozsahu VKV leteckého pásma na světové radiové konferenci v Atlantic City v roce 1947. Letecké komunikaci bylo přiděleno pásmo mezi 118 MHz a 132 MHz (pozn.: což je o několik megahertzů méně než je dnes, k jejímu rozšíření na stávající podobu došlo až v roce 1979). Přidělený rozsah frekvencí byl schopný nově pojmout 70 kanálů s jejich separací 200 kHz. V následujících letech několikrát dochází ke zmenšení kanálové separace v důsledku neustálého nárůstu a vyšší poptávky po zajištění kapacit pro leteckou komunikaci. Vše se tedy odehrává společně s technologickým vývojem. Pro jednoduchý přehled slouží tabulka 2, která ilustruje vývoj v několika dalších letech až k současně používanému formátu. [2]

Tabulka 2: Vývoj snižování kanálové separace (zdroj: převzato z [2]).

Rok	Kanálová separace	Počet (teoreticky dostupných) kanálů
1950 - 1959	100 kHz	140 kanálů
1959	100 kHz	180 kanálů (pouze rozšíření pásma)
1960 - 1969	50 kHz	360 kanálů
1972	25 kHz	720 kanálů
1996	8,33 kHz	2280 kanálů

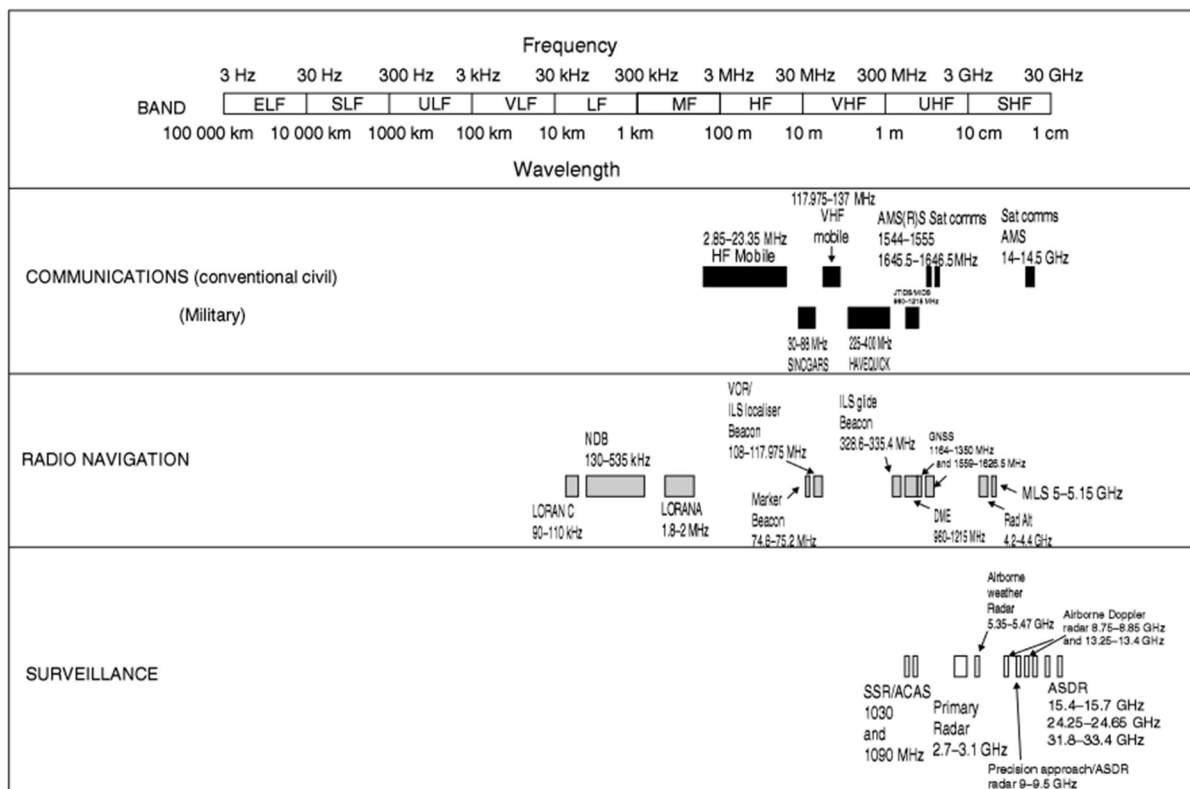
2.2.2 Současnost

Formát, který se v současné době používá, se nazývá DSB-AM (double side band – amplitude modulation). Jak již z názvu vyplývá, jedná se o amplitudově modulovaný signál. Zkratka DSB pak určuje přímo typ amplitudové modulace. Průběh této amplitudové modulace je rozebrán v kapitole 2.3.

V současné době pásmo pro hlasovou komunikaci VKV zastupuje pásmo v rozmezí 117.975 – 137.000 MHz, které pro tuto komunikaci bylo přiděleno roku 1979. Toto pásmo je jak na horní, tak na dolní hranici omezeno vojenskými komunikačními systémy viz obrázek 2 (na obrázku označeno VKV jako VHF - Very High Frequency). [2]

Pro civilní komunikaci se používá kanálové separace 8,33 kHz, podle nařízení Evropské unie z roku 2012 – „O jednotném nebi“. Kanálová separace 8,33 kHz, poskytuje teoretickou možnost využití až 2280 možných použitých frekvencí. Jedná se však pouze o teoretickou

hodnotu, neboť je nutné počítat s rezervací určitých frekvencí pro nouzové účely, a také pro účely kooperace starší 25 kHz a novější 8,33 kHz kanálové separace. Pro doplnění lze uvést, že v USA se stále využívá kanálové separace 25 kHz dle předpisů FAA, s předpokladem nahrazení hlasové komunikace komunikací datovou, a dále pak v některých zemích Třetího světa je možné se setkat i s ještě vyšší kanálovou separací. Ostatně i na území ČR je možné se setkat s vyšší kanálovou separací, kdy pro armádní účely je použita separace 25 kHz (ta je však mimo definované pásmo) a pro radiomajáky dokonce 50 kHz. [2] [15]



Obrázek 2: Rozložení telekomunikačního spektra v letectví (zdroj: převzato z [2]).

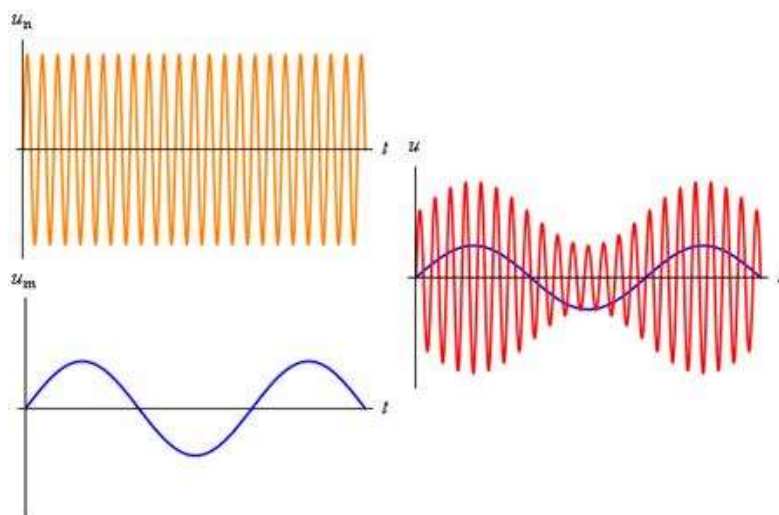
2.2.3 Budoucnost

Vzhledem k trvale rostoucímu objemu letecké dopravy bude s velkou pravděpodobností neustále pokračovat zvyšování požadavků na komunikační systémy a lze tudíž očekávat, že se vývoj dostane až do bodu kapacitního maxima současného systému. S přihlédnutím k tomu, že kanálová separace už je nyní na možném minimu, bude nutné vymyslet, jakým způsobem tento problém dále řešit. Jednou z cest by mohlo být opětovné rozšíření pásma vyhrazeného pro leteckou komunikaci, což se však v současném obsazení ostatních frekvencí jeví nereálně, a proto bude reálnější jiná možnost a tou je: efektivnější využití již přiděleného pásma. Nabízí se možnost opětovného snížení kanálové separace, ale při jejím zmenšení už by docházelo ke snížení zvukové kvality, což je pochopitelně nežádoucí. Pozornost tak bude

třeba zaměřit na vytvoření a implementaci nového systému, které částečně, nebo zcela umožní nahradit hlasovou komunikaci, komunikací efektivnější a to datovou.

2.3 Amplitudová modulace DSB

Jedná se o proces, kdy se upravuje amplituda signálu u_n o vysoké frekvenci (nazývaná jako nosný signál) za pomoci nízkofrekvenčního signálu u_m a vzniká tím tak výsledný modulovaný signál u . K lepšímu pochopení principu povede obrázek 3. [4]



Obrázek 3: Amplitudová modulace (zdroj: převzato z [4]).

Matematická definice amplitudové modulace je pak dána jako:

$$f_c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi)\pi \quad (2.3)$$

kde $f_c(t)$ je výsledný amplitudově modulovaný signál, a A je amplituda modulovaného signálu, která je určena:

$$A = K + f_m(t) \quad (2.4)$$

kde K je amplituda nemodulovaného nosného signálu, a $f_m(t)$ je modulační signál, který lze definovat:

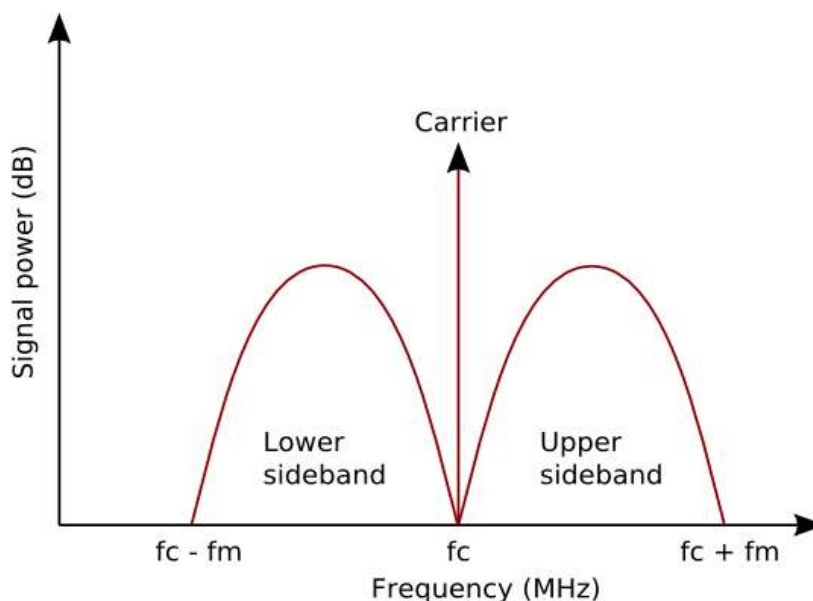
$$f_m(t) = a \cos(2\pi f_m t) \quad (2.5)$$

Po uvedení potřebných veličin, lze zavést další charakterizující parametr, kterým je hloubka modulace a je definována vztahem:

$$m = \frac{\text{amplituda modulačního signálu}}{\text{amplituda nemodulovaného nosného signálu}} = \frac{a}{K} \quad (2.6)$$

Hloubka modulace by vždy měla být menší než 1. Uvádí-li se v procentech, tak menší než 100%. Pokud by totiž hloubka modulace byla vyšší, došlo by ke zkreslení signálu. V praxi se tak proto často používají hodnoty nižší. [2]

Vysvětlení pojmu DSB je možné provést jednoduše obrázkem. Ve frekvenční charakteristice, jak je možné si všimnout na obrázku 4, se objeví obě postranní pásma (dolní – vlevo od f_c a horní – vpravo od f_c). Uprostřed se nachází nosná frekvence signálu.



Obrázek 4: Frekvenční schéma amplitudové modulace (zdroj: převzato z [23]).

Amplitudová modulace poskytuje několik výhod oproti jiným modulacím. Mezi hlavní faktory by se mělo zařadit to, že při amplitudové modulaci nedochází k významnému ovlivnění vyslaného signálu Dopplerovým jevem a zároveň doplnit, že s použitím této modulace nemůže dojít k vyrušení signálů dvou současně vysílajících stanic, jak se může stát u modulace frekvenční. Stálost a kontinuita spojení je v letectví klíčová, proto se volí amplitudová modulace, při které je tento jev minimalizován. [2]

K již zmíněným faktorům lze jistě přidat další, které mluví ve prospěch amplitudové modulace. Jedná se například o snadnou schopnost syntetizace a demodulace. Rovněž je snadné s amplitudovou modulací pracovat, jelikož je možné nahlédnout do každé fáze jejího procesu, a v neposlední řadě lze považovat za nespornou výhodu i skutečnost přítomnosti silného nosného signálu, který je zachycen vždy i přesto, že se společně se signálem neodešle žádná informace. Příjímač je díky tomu alespoň schopen si uchovat informaci o hodnotě vysílané frekvence. [2]

Všechno tyto faktory zapříčiňují, že veškerá komunikace probíhající v oblasti civilního letectví je amplitudově modulována.

2.4 Realizace VKV přenosu

Aby bylo možné realizovat přenos za pomoci VKV, musí k tomu být vhodně nastavené podmínky a potřebné vybavení. Rozdělit je lze do několika dílčích bodů:

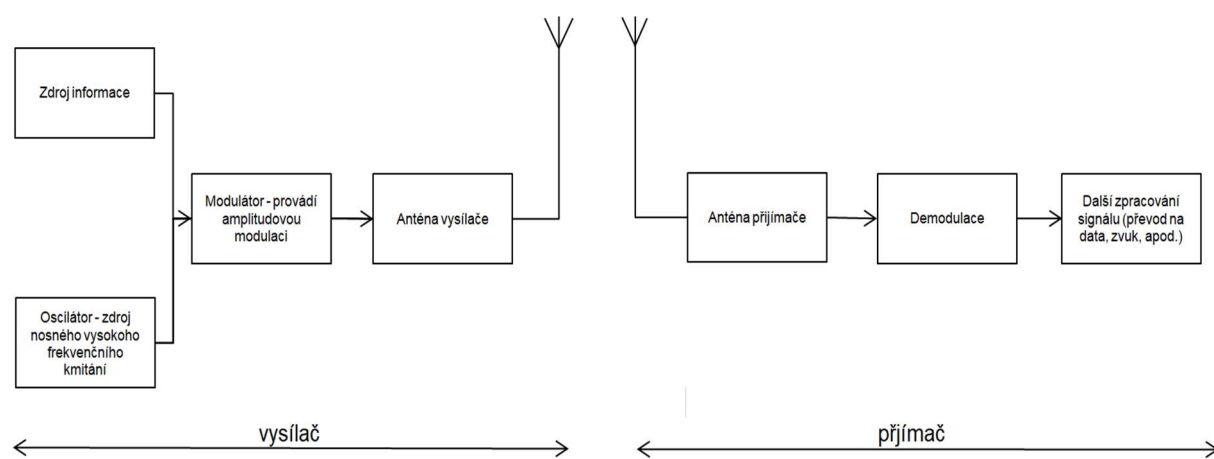
Frekvence signálu – na volbě vhodné frekvence závisí účinnost přenosu. Z tohoto důvodu se volí oblast VKV, která poskytuje dostatečnou schopnost šíření signálu, zároveň při relativně nízké energetické náročnosti. [2]

Přijímač a vysílač – jejich funkce vyplývá už z jejich názvu. Vysílačem tak rozumíme zařízení, které je schopno převést elektrický signál do vysílané radiové frekvence a odeslat ji směrem k přijímači. Přijímač pak pracuje přesně obráceně. [16]

Schopnost šíření signálu – schopnost šíření signálu závisí ve velké míře na prostředí a samotné frekvenci šíření. U VKV je nutností, aby vysílač přímo „viděl“ na přijímač. Samozřejmou skutečností je, že díky schopnosti šíření elektromagnet. vln vzduchem je způsob přenosu informací mezi přijímačem a vysílačem možný. [2]

Anténa – je zařízení, které je součástí přijímače a vysílače, jenž je schopno zprostředkovat přesun signálu od vysílače k přijímači. Z fyzikálního hlediska lze také použít označení elektromagnetický dipól. [2] [16]

Pro ilustraci a lepší představu slouží obrázek 5.



Obrázek 5: Zjednodušené blokové schéma realizace radiového přenosu (zdroj: autorův archiv).

2.5 Princip funkce softwarově definovaného rádia – SDR

Jedná se o princip a způsob zpracování přijímaného signálu. Slovo software není v názvu uvedeno náhodou. Během tohoto zpracování dochází k tomu, že se samotný výpočetní výkon provede pouze za pomoci softwarového vybavení, není tak třeba přítomnosti demodulátorů, detektorů, filtrů, či oscilátorů fyzicky přímo v přijímači. Přijímaný signál se rovnou, za pomoci

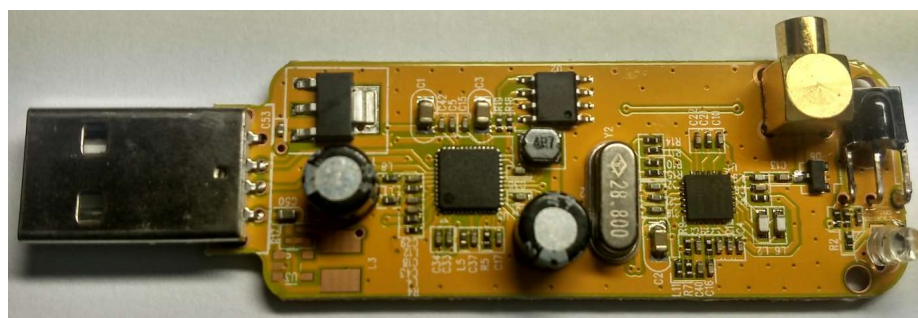
A/D převodníků, převede z analogové do digitální podoby. Veškeré další zpracování signálu jako demodulace, či jakákoliv jiná následná úprava, probíhá už s využitím výkonu zařízení, kde je instalovaný potřebný software. Při výkonu dnešních procesorů se jedná o velmi efektivní zpracování, kdy takovýto přístup poskytuje hned několik výhod. Mezi ně je možné zařadit bezpochyby vyšší frekvenční rozsah, větší šířku pásma přijímaného signálu a rovněž také neomezenost dalšího zpracování díky digitální podobě. [19] [20]

2.6 SDR za pomoci RTL

Tento přístup dovoluje možnost analyzovat radiové spektrum s využitím levného DVB-T tuneru (dongle) primárně určeného pro příjem DVB-T signálu (televizní vysílací spektrum). Bylo totiž zjištěno, že je možné za pomoci změny ovladačů zajistit, aby distribuoval přímo surová I/Q data pro další zpracování ve větším rozsahu, než se pohybuje DVB-T vysílání. Tato možnost byla poprvé představena pány Anttim Palossaarim a Ericem Fryem v rámci projektu Osmocon. [20]

RTL-SDR dongle je přijímač velikosti přibližně USB flash-disku (viz. Obrázek 6.) Standardně je vybaven dvěma konektory pro připojení – USB a anténním konektorem. Z pohledu vnitřní výbavy tvoří hlavní složku chip RTL2832U (odtud spojení RTL-SDR) – který slouží jako 8bitový AD převodník. Ten disponuje vysokou vzorkovací frekvencí, která je až 3,2 milionů vzorků za sekundu (MSPs), a která má přímý vliv na šířku najednou sledovatelného pásma. Další důležitou složkou vnitřního uspořádání je tuner udávající frekvenční rozsah na laditelných frekvencích. V případě zařízení zvoleného pro navrhovaný přijímací systém se jedná o tuner Rafael Micro R820T, který umožňuje příjem v rozsahu 24 – 1750 MHz. [19] [20]

Asi největší výhodou tohoto řešení je, že umožňuje realizaci SDR přijímače s významnou finanční úsporou v porovnání s již hotovými SDR přijímači. Již hotová řešení SDR se dají pořídit v řádech tisíců korun, kdežto běžný DVB-T přijímač se dá sehnat v řádu stokorun. Stačí ho za pomoci konektoru propojit s dostatečně výkonným hardwarem, zvolit vhodné softwarové vybavení a může se začít s příjmem radiového spektra.



Obrázek 6: RTL-SDR dongle (zdroj: autorův archiv).

3. Analýza trhu s VKV a SDR přijímači

Při výběru toho správného přijímače je možné narazit na mnoho produktů. Oblast SDR zaznamenala v posledních letech, díky svému potenciálu, veliký rozvoj. Vzniklo tak několik nových zařízení, které díky svým vlastnostem určitě stojí za zvážení při realizaci přijímacího systému. Pod vlivem značné konkurence firem je tak nabídka přijímačů dostatečně široká. Analýza provedená v mé práci je zaměřena pouze na přijímače, které jsou srovnatelné se zařízeními vybraným pro realizaci.

Seznam analyzovaných přijímačů:

- FUNcube Dongle Pro+
- SDR Play RSP2
- Airspy R2
- Airspy mini
- HackRF One
- LimeSDR mini
- RTL-SDR V3
- USB TV RTL2832U+R820T – Tuner DVB-T

Jednou z nejznámějších společností, která produkuje SDR přijímače je bezpochyby americká Airspy, jenž nabízí velmi výkonný přijímač, včetně zmenšené varianty, a která dokonce dodává ke všem produktům i svůj vlastní software. Pozadu jistě nezůstává společnost Lime microsystem, která nedávno rovněž nabídla zmenšenou variantu svého původního přijímače. Ten zaznamenal velký úspěch při své crowdfundingové kampani. Značné popularity se však nyní těší přijímač HackRF One, sestavený společností Great Scott Gadgets. Tento přijímač těží hlavně ze své všestrannosti použití, jelikož se dá použít i jako vysílač.

V následující části se shrnou informace o zmíněných přijímačích. A porovnájí se s přijímačem, který je dostupný pro příjem hlasové VKV komunikace pro zamýšlený systém.

3.1 FUNcube Dongle Pro+

Vznikl jako projekt s podporou britského sdružení UK Amateur Radio Educational Satellite. Hlavní tvůrcem je Howard Long. V našem seznamu je uveden zejména proto, že je to přijímač velice podobný námi dostupnému DVB-T tuneru a také proto, že je to typický zástupce práce radioamatéra. Za vzor, jak je i z obrázku 7 patrné, má běžný DVB-T tuner, oproti němu je však vylepšen hned několika úpravami. Mezi ně patří aplikace filtrů, která vede k vyšší mezi modulační stabilitě. Dalším rozdílem oproti běžnému DVB-T tuneru je použití 16bitového převodníku, namísto 8bitového a širka sledovatelného pásma. Ta je u tohoto přijímače mnohonásobně nižší (0,192 MHz), což je však vykoupeno značně širším frekvenčním

rozsahem. Pro propojení přijímače s počítačem slouží USB a pro anténní vstup je použit SMA konektor. [11]



Obrázek 7: Přijímač FUN Cube Dongle Pro+ při propojení s PC a anténou (zdroj: převzato z [11]).

3.2 SDR Play RSP2

Jedná se o projekt malé společnosti sídlící ve Velké Británii. K dispozici je ve dvou provedeních a to: RSP2 a RSP2 pro (viz. Obrázek 8). Tyto dvě verze se však liší pouze obalem, ve kterém jsou uloženy. Z hlediska frekvenčního rozsahu obě verze nabízejí totožné hodnoty od 1kHz do 2 GHz se sledovatelným pásmem 10 MHz, což je znatelně více, než běžný DVB-T tuner. Ve vnitřním vybavení lze nalézt mnoho filtrů, které mimo jiné dovolují odfiltrování rušivého vysílání AM/FM rádia. Je dodáván včetně vlastního softwaru SDRuno, který společně s výkonným zařízením dovoluje poslech až 16 různými posluchači, kdekoliv v 10 MHz spektru. Je možné ho použít i s jiným než dodávaným softwarem a lze ho propojit se všemi běžnými platformami, díky integrovanému ovladači. Výrobce dále udává, že najednou lze připojit až 3 antény díky dvěma SMA konektory a jednomu High-Z. K propojení s počítačem a napájení by měl sloužit konektor USB 2.0. [22]



Obrázek 8: Vnější pohled na přijímač RSP2 a RSP2 pro (zdroj: převzato z [22]).

3.3 Airspy R2

Velmi používané zařízení pro SDR aplikace. Jedná se o nejvýkonnější model společnosti Airspy z USA. Frekvenční rozsah má stejný jako běžný DVB-T tuner, neboť je vystavěno na tuneru R820T2 od výrobce Rafael Electronics. Čím se však odlišuje od běžného tuneru je především výkonem. Poskytuje totiž až trojnásobně širší sledovatelné pásmo – až 10 MHz. Obsahuje rovněž výkonnější AD převodník, a to 12bitový s rychlostí 20 MSPs s možností přetaktování za pomoci vhodného firmwaru. S čím je však nutné počítat, že zvýšené nároky vyžadují vyšší výkon hardwaru, což znamená, že se běžně nedá použít v kombinaci s mini PC jako např. s Raspberry. Experimentálně je sice možné přijímané pásmo zúžit a vzorkovací frekvenci snížit, ale zde už je nejspíše výhodnější variantou použít zmenšenou verzi, a to přímo Airspy mini. Nevýhodou použití modelu mini by pak mohla být absence čipu zajišťující možnost připojení externí časové značky, která může být pro některé aplikace zásadní – např. určování polohy. K oběma zařízením lze dokoupit doplněk s názvem Spyverter, který dovoluje příjem i nižších frekvencí než 24 MHz a rozšíří tak přijímané pásmo i na oblast KV. Výrobce pak zajišťuje kompatibilitu pro oba modely. K přenosu dat a k propojení je použit konektor USB, pro příjem signálu anténní konektor SMA a oproti Airspy mini i vstup MCX (viz. Obrázek 9) použitý pro časovou značku. [3]



Obrázek 9: Zařízení Airspy R2 (zdroj: převzato z [3]).

3.4 Airspy mini

Navazuje přímo na předchozí model Airspy R2. Z hlediska vnitřního vybavení je téměř totožný jako jeho předchůdce. Obsahuje stejné filtry, má stejný frekvenční rozsah a to 24–1700 MHz i stejný převodník, který je 12bitový s rychlostí 20 MSPs. Čím se liší je to, že neobsahuje čip Si5351, což má za následek zúžení sledovatelného pásma z 10 na 6 MHz. Tento krok výrobce volil proto, že užší sledovatelné pásmo klade menší nároky na výpočetní výkon a lze tak Airspy mini propojit s platformami jako Raspberry Pi, Odroid, Pine 64 a další. U předchozího modelu tento způsob nebyl běžně možný. Za pozitivum lze určitě považovat i dostupnost softwaru vyvíjeným přímo společností Airspy. K připojení k počítači poslouží konektor USB a pro anténu je použit konektor SMA (viz. Obrázek 10). Při porovnání s běžným DVB-T tunerem vynikne především téměř dvojnásobná velikost sledovatelného pásma a rychlejší převodník. To se samozřejmě odrazí v ceně, která je několikanásobně vyšší, ačkoliv je Airspy mini k dostání za polovinu toho, co jeho předchůdce. [3]



Obrázek 10: Airspy mini bez kovového krytu (zdroj: převzato z [3]).

3.5 HackRF One

Zařízení (viz. Obrázek 11) navržené Michealem Ossmannem, vyrobené jeho společností Great Scott Gadgets a podpořeno grantem DARPA disponuje 8bitovým převodníkem s vzorkovací frekvencí až 20 MSPs, což umožňuje sledování pásma až o šíři 20 MHz. Čím však vyniká je frekvenční rozsah od 1 MHz až po 6 GHz. Tento obrovský rozsah dovoluje, že

je možné ho použít jako velmi univerzální SDR. Svým pokrytím totiž dokáže zachytit téměř všechny signály, které jsou v dnešní době vysílány. Ať už je jedná například: o mobilní síť GSM, signály GPS, přehledový systém ADS-B, nebo jakýkoliv dostupný vysílač v domácnosti (garážová vrata, centrální zamykání automobilu, ovladač TV, ...) a mnohé další. [13]



Obrázek 11: Vnější pohled na přijímač HackRF One (zdroj: převzato z [13]).

Další zásadní předností je, že zařízení je schopno fungovat jako tzv. half duplex. Toto zařízení je tak možné použít buď jako přijímač, anebo jako vysílač. Za pomoci vhodného softwaru lze docílit nejen analýzy přijatého signálu, ale i generace jakéhokoliv vysílacího signálu. Zařízení tak například dokáže přijímaný signál zaznamenat a samo replikovat. K tomuto účelu je dokonce k dispozici i rozšíření s názvem „Portapack for HackRF one“. To je vybaveno LCD displejem, baterií a ovládacími prvky, jenž z přijímače dělají snadno přenosné zařízení (viz. Obrázek 12). Všechny zde uvedené fakty společně s tím, že je zařízení distribuováno jako „open source“ platforma, ho činí nejuniverzálnějším zařízením tohoto typu z hlediska jakéhokoliv myslitelného použití. [13] [19]

Mezi velmi zajímavé konkrétní aplikace lze zařadit například: replikace signálu centrálního zamykání automobilů (především u starších modelů), dekodování zpráv záchranných složek, rušení a generace falešného signálu GPS – i jako úplná změna polohy, generování falešných zpráv systému ADS-B a mnohé další. [19]

Jinak je zařízení dodáváno bez jakéhokoliv softwaru, ale výrobce udává, že je kompatibilní s běžně, volně dostupným softwarem pro SDR. Co se týká propojení s ostatními komponenty, tak zde nalezneme dva SMA konektory pro připojení antény a USB 2.0. [13]



Obrázek 12: Rozšíření Portapack na přijímač HackRF One (zdroj: převzato z [28]).

3.6 LimeSDR mini

Rozměry velice podobný přijímač jako DVB-T tuner. Vytvořen podobně jako Airspy mini na základě svého předchůdce. Při pohledu na vnitřní vybavení je možné zjistit, že obsahuje 12bitový převodník. Rozsahem přijímaných frekvencí od 10 MHz až do 3,5 GHz a šířkou sledovatelného pásma téměř 31 MHz vyváží absenci jakéhokoliv softwaru a složitější instalaci potřebných ovladačů. Lze ho použít stejně jako HackRF One i jako vysílač. Na propojení s ostatními komponenty poslouží dva konektory SMA a USB typu A (viz. Obrázek 13). Jedná se bezesporu o zajímavou alternativu jak k Airspy mini, tak i k běžnému tuneru, proti hovoří však v obou případech vyšší cena. [24]



Obrázek 13: LimeSDR mini – pohled na vnitřní komponenty (zdroj: převzato z [24]).

3.7 RTL-SDR V3

Jednoduše ho lze charakterizovat jako běžný DVB-T tuner, který prošel několika změnami, mající za následek lepší a stabilnější funkci přijímače. Mezi nejhlavnější změny patří použití oscilátoru označeného jako 1PPM TCXO, který zamezuje posunu frekvence při změnách teplot tuneru vlivem výpočetního zatížení. Další změnou je použití kovového obalu a chladicí plošky k zamezení přehřátí přijímače při vysokém zatížení. Co se týká konektorů, zařízení nabízí standartní USB. Původní MCX však bylo nahrazeno za běžnější SMA ve snaze

zjednodušit instalaci (viz. Obrázek 14). Při pohledu na frekvenční rozsah, či šířku sledovatelného pásma lze zjistit, že se jedná o téměř totožné hodnoty jako u běžného DVB-T tuneru. Každá změna se samozřejmě promítne do ceny, která je oproti běžnému DVB-T tuneru přibližně trojnásobná. K dostání je pak přímo na e-shopu webu, jenž se nejspíše stará i o jeho výrobu. K dostání je ve dvou variantách, a to buď jako samostatný přijímač, nebo v kombinaci s anténou. Vzhledem k úpravám se jedná o naprosto ideální zařízení pro použití k radioamatérským účelům. [19]



Obrázek 14: Upravený, běžně dostupný DVB-T tuner na RTL-SDR V3 (zdroj: převzato z [19]).

3.8 DVB-T tuner

Z hlediska vnitřního vybavení je tento přijímač rozebrán v kapitole 2.6. Přijímač dostupný pro návrh systému se od běžného DVB-T tuneru nijak neliší. K sehnání je i na českých e-shopech, a to za velmi přijatelnou cenu, s přihlédnutím k tomu, co vše nám dokáže nabídnout. Podrobnější popis by tak byl pouze opakováním.

3.9 Závěrečné zhodnocení přijímačů

Pro lepší přehlednost je zde uvedena tabulka 3 s několika základními parametry. Mezi ně je nutné bezpochyby zařadit typ AD převodníku, frekvenční rozsah a jak velké pásmo je schopen přijímač sledovat v jeden moment. Zmíněné parametry jsou následně navíc ještě doplněny informacemi o poskytování softwaru ze strany výrobce a také o to, za jakou cenu ho lze pořídit a zdali je běžně dostupný na území ČR.

Tabulka 3: Specifikace přijímačů (zdroj: [3] [11] [13] [19] [22] [24])

Přijímač	Typ AD převodníku	Frekvenční rozsah	Sledovatelné pásmo
FUNcube dongle pro +	16bit	150 kHz - 260 MHz a 410 MHz - 2.05 GHz	0,192 MHz
SDRPlay RSP2	12bit	10 kHz – 2 GHz	10 MHz
Airspy R2	12bit	24 MHz – 1750 MHz*	10 MHz
Airspy mini	12bit	24 MHz – 1750 MHz*	6 MHz
HackRF one	8bit	1 MHz – 6 GHz	20 MHz
sítíLimeSDR mini	12bit	100 kHz – 3,8 GHz	30,72 MHz
RTL-SDR V3	8bit	24 MHz – 1750 MHz	3,2 MHz**
<i>DVB-T tuner</i>	<i>8bit</i>	<i>24 MHz – 1750 MHz</i>	<i>3,2 MHz**</i>

* Při dokoupení produktu Spyverter dovoluje příjem i frekvencí pod 24 MHz.

** Jedná se o teoretickou hodnotu, stabilně jsou tyto zařízení schopny šířky sledovatelného pásma pouze 2,4 MHz.

Ze specifikací dostupných ze stránek jednotlivých výrobců vyplývá, že většina nabízených SDR přijímačů by poskytovala lepší výkonnostní parametry než pro realizaci dostupný přijímač, samozřejmě vyjma výrobku FUNcube dongle pro+, který však předčí běžný DVB-T tuner v oblasti frekvenčního rozsahu a výkonnějšího AD převodníku. Jelikož však bude přijímací systém pracovat pouze v oblasti VKV komunikace, lze považovat rozsahy některých dostupných SDR přijímačů z tohoto pohledu za značně předdimenzované. Co by však mohlo funkčnost přijímacího systému limitovat, je šířka sledovatelného pásma. Běžný DVB-T tuner dosahuje pouze poloviční šířky než například přijímač Airspy mini. Bohužel výkonnostní parametry nejsou jediným souborem hodnot, který rozhoduje o pořízení takového přijímače.

Dalším faktorem při pořizování je bezesporu uživatelská dostupnost, a to ať už z hlediska distribuce výrobku do jednotlivých zemí a jeho pořizovací ceny, tak i z hlediska náročnosti práce se zařízením a jeho softwarové připravenosti od výrobce. Vše je přehledně uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry náročnosti na pořízení a instalaci (zdroj: [3] [8] [11] [13] [19] [22] [24])

Přijímač	Prodej v ČR	Software od výrobce	Cena
FUNcube dongle pro +	NE	Není k dispozici	3 600 – 3 800 Kč
SDRPlay RSP2	NE	SDRuno	4 800 – 5 000 Kč
Airspy R2	ANO	SDRSharp	4 800 – 5 200 Kč
Airspy mini	ANO	SDRSharp	2 200 – 2 400 Kč
HackRF one	NE	Není k dispozici	3 800 – 4 600 Kč
LimeSDR mini	NE	Není k dispozici	3 300 – 3 500 Kč
RTL-SDR V3	NE	Není k dispozici	600 – 700 Kč
<i>DVB-T tuner</i>	<i>ANO</i>	<i>Není k dispozici</i>	<i>Od 300 Kč*</i>

* Při objednání ze zahraničních portálů, lze cenu snížit až na hranici 200 Kč.

Z ní jasně vychází, že běžný DVB-T tuner má ze všech zmíněných nejnižší pořizovací náklady. Navíc je snadno přímo k dostání v ČR, což má samozřejmě značné benefity, neboť u ostatních přijímačů musíme ještě počítat s náklady na dopravu. Rovněž se tím stává i případný zákaznický servis dostupnější. Samozřejmě, že tento ústupek je způsoben jiným primárním účelem použití toho přístroje, a z toho důvodu k němu nemůže být dostupný software přímo od výrobce. Vzhledem k výše zmíněným výhodám, především pak díky cenové dostupnosti, je tudíž základní možností pro návrh zamýšleného systému. V kombinaci s dobře vybranou a umístěnou anténou, s dobrým výpočetním zařízením a s volbou vhodného softwaru (jenž je rozebrán v kapitole 4.2.) lze v případě nedostatečné kapacity systému vyměnit tento přijímač za víceméně jakoukoliv, výše zmíněnou, výkonnější alternativu.

3.10 Antény

3.10.1 Diamond D-777

Jedná se o vertikální anténu výrobcem přímo navrženou pro poslech leteckého pásma VKV (viz. Obrázek 15). Jelikož je její rozsah omezen na civilní a vojenské pásmo dosahuje vynikajícího zisku, který je v rozmezí od 3,4 dB do 5,5 dB. Z konstrukčního hlediska je její obal vyroben ze sklolaminátu a zaručuje tak odolnost vůči vniknutí vody. Dlouhá je 1,7 metru, pro připojení využívá konektor SO239 a navržena je jako anténa přijímací. Někteří distributoři k anténě, za příplatek, dodávají redukci na konektor běžně dostupnější BNC, nebo SMA. K dostání je přibližně za 1 800 Kč. [6] [9]



Obrázek 15: Anténa Diamond D-777 - na obrázku anténa vlevo (zdroj: autorův archiv).

3.10.2 AOR DA-3200

Anténa je zkonstruována výrobcem AOR. Na první pohled si lze na obrázku 16 všimnout odlišné konstrukce v porovnání s předchozí anténou. Jedná se totiž o širokopásmovou anténu typu disccone, nebo také jinak řečeno o skenerovou anténu. Přednost takovéto konstrukce tkví především ve schopnosti přijmout velmi široké frekvenční rozmezí. U tohoto typu se konkrétně jedná o hodnoty od 25 MHz do 3000 MHz. K tomu se váže i způsob využití, kdy nám poskytuje možnost univerzálnější aplikace. Cena u takovéhoho typu antény je logicky vyšší vzhledem ke složitější konstrukci. K dostání je zhruba za dvojnásobek ceny než anténa výše. Přestože je tato anténa konstruována jako přijímací, tak v porovnání s předchozí anténou dosahuje nižšího zisku a to 3,0 dB, což je způsobeno širokým rozsahem. Nicméně se tyto antény dají použít i jako antény vysílací. I zde však platí to samé jako během přijímání signálu, proto je lepší pro vysílání použít anténu, která má vysílací spektrum úžeji zaměřené. [7] [9]



Obrázek 16: Disccone anténa AOR DA-3200 (zdroj: převzato z [9]).

3.10.3 Diamond D-130

Druhá anténa typu discone, která je oproti modelu DA-3200 lépe uzpůsobena i pro vysílání, díky vyššímu dosažitelnému výkonu, což je způsobeno mimo jiné i tím, že má užší frekvenční rozsah, který dokáže přijmout. Ten je zhruba třetinový, neboť začíná na hodnotě 25 MHz a končí u hodnoty 1300 MHz. Cenově se pak tento model pohybuje zhruba na půl cesty, mezi cenovkami výše zmíněných modelů – konkrétně okolo 2 500 Kč. U obou antén typu discone je nutné počítat s tím, aby na instalaci bylo k dispozici dostatek místa, protože oproti běžné vertikální anténě jsou prostorově větší, především se to týká rozměru šířky. [6] [9]

3.10.4 Sirio GP 108-136 LB/UHV

Anténa zhotovena z duralu s úzce zaměřeným přijímacím spektrem, které se soustředí přímo na civilní pásmo letecké komunikace. Frekvenční rozsah je výrobcem sdělen už v samotném názvu a to od 108 MHz do 136 MHz. Jedná se o alternativu k anténě D-777. Její délka je zhruba poloviční a cenově je naprosto srovnatelná. Parametrem, v kterém však zaostává vůči svému japonskému konkurentovi, je nemožnost příjmu vojenského pásma a rovněž také fakt, že její zisk je jen 2,15 dB. Zobrazena je na obrázku 17. [17]



Obrázek 17: Anténa Sirio GP 108-136 LB/UHV – zkrácený náhled (zdroj: převzato z [17]).

3.10.5 SCAN WBA-20

Jedná se o anténu, která je podobné konstrukce jako anténa D-777 a je vyrobena ze sklolaminátu. Velikostí je pak zhruba poloviční. Přijímané pásmo má rozmezí od 117 do 140 MHz. Nepokrývá tak celé civilní pásmo, na rozdíl od předchozích antén. Tento fakt anténa kompenzuje tím, že je navržena tak, aby mohla být použita i k vysílání v rozmezí téměř totožném jako je schopna přijímat. Z hlediska aplikace je vhodná především pro případy, kdy uživatel plánuje v tomto pásmu nejen přijímat signál, ale i vysílat. Protože při použití pouze pro příjem, jsou za cenu 1 500 Kč k dispozici lepší a výhodnější řešení. [10]

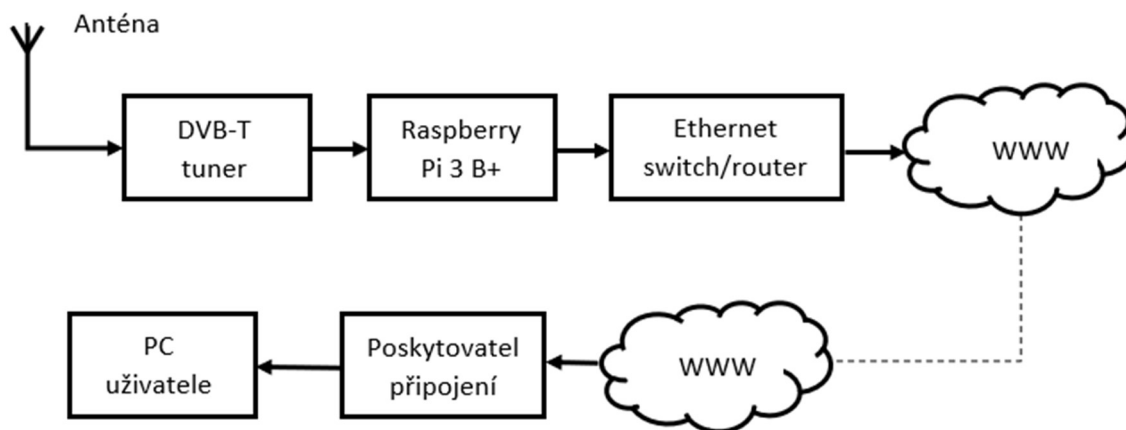
4. Návrh systému

Další bod je zaměřený na popis návrhu přijímacího systému. Dostupných možností, jak se s návrhem vypořádat, je celá řada, a proto je nutné vědět, jaká jsou očekávání od schopností přijímacího systému. Důležité také pro návrh bude, jakým způsobem se bude systém ovládat a co všechno musí koncový uživatel splňovat, aby mohl přijímacího systému využít. Všechny otestované způsoby, jak návrh VKV přijímacího systému založeného na SDR řešit, by se daly rozdělit do tří základních skupin dle náročnosti a nutného programového vybavení koncového posluchače.

1. Lokální instalace – Poslech komunikace přímo na zařízení propojené s přijímačem.
2. Vzdálená instalace – Příjem a poslech komunikace, který je zprostředkován přenosem dat za pomoci protokolu TCP/IP, na vzdálené zařízení od přijímače, na kterém je nutné mít instalovaný speciální software.
3. Vzdálená instalace s webovým rozhraním – Příjem a poslech komunikace, který je zprostředkován za pomoci webservru, na vzdálené zařízení od přijímače, kde není nutné mít instalovaný speciální software, ale postačí pouze webový prohlížeč.

4.1 Vybraný hardware přijímací stanice

Ještě předtím, než je možné řešit výhody a nevýhody jednotlivých řešení, je nutné vědět, jaký hardware je pro realizaci k dispozici, aby se jeho možnostem dal návrh co nejvíce přizpůsobit. Detaily o přijímači (DVB-T tuner) jsou již uvedeny v kapitole 2.6. Co je však podstatné, že navrhovaný přijímací systém se nemůže sestávat pouze z přijímače. Musí být doplněn o vhodný hardware, který poskytne dostatečný výkon k tomu, aby bylo možné přijímané signály buď rovnou zpracovávat, nebo z něj vytvořit webserver, který přijatá data bude distribuovat do dalšího zařízení – v případě navrhovaného systému do počítače. Pro tyto účely byl pořízen jednočipový mini počítač – Raspberry, model Pi 3 B+. Schéma návrhu systému je znázorněno na obrázku 18.



Obrázek 18: Výsledný návrh systému (zdroj: autorův archiv).

4.1.1 Raspberry Pi 3 B+

Jedná se o jednočipový mini počítač (viz. Obrázek 19), který byl pro účel realizace přijímacího systému fakultou pořízen. Rozměry se přibližuje přibližně velikosti pánské peněženky. I přes tyto kompaktní rozměry však skýtá dostatek výkonu pro přijímací systém. Vybaven je 1,4 GHz procesorem ARM Cortex-A53 a operační pamětí o velikosti 1 GB. K propojení s DVB-T tunerem poslouží jeden ze 4 dostupných USB portů. Zobrazení grafického výstupu je řešeno za pomoci standardního konektoru HDMI. Zvukový výstup je možné provést digitálně skrze HDMI, nebo prostřednictvím 3,5 mm konektoru pro analogový výstup. K distribuci dat skrze internetovou síť lze použít jedno gigabitového Ethernet konektoru. Samozřejmě je i přítomnost Wi-Fi a Bluetooth modulu. Napájení je řešeno za pomoci micro USB konektoru, nebo skrze ethernetový konektor – tato možnost však vyžaduje nákup externího doplňkového modulu. O probíhající procesy se stará operační systém nazvaný Raspbian, který je založen na bázi Linuxu. [26]



Obrázek 19: Jednočipový mini počítač Raspberry Pi 3 B+ (zdroj: autorův archiv)

4.1.2 Raspberry Pi4

V průběhu vzniku této bakalářské práce oznámila britská společnost zahájení prodeje nové verze mini počítače Raspberry, a to jeho čtvrté generace. Ta oproti své předchozí nabízí vylepšení, které mají za cíl, aby se Raspberry dalo použít jako plnohodnotný osobní počítač. Svědčí o tom nejen použití procesoru ARM Cortex-A72 s frekvencí 1,5 GHz, ale i možnost výběru modelu s operační pamětí od 1 GB až po 4 GB. Zlepšena byla výrazně i konektivita, kdy byl upgradován jak Ethernetový konektor, tak byla povýšena i bezdrátová technologie Bluetooth. Úprav doznaly i konektory pro přenos médií, kdy byl klasický konektor HDMI nahrazen za dva micro HDMI konektory, a je tak možné k Raspberry připojit současně dva monitory. Dva ze čtyř konektorů USB byly povýšeny na USB 3.0. Změn dostal i napájecí micro USB konektor, který je u nové verze povýšen na USB-C, především z důvodu vyššího odběru

zařízení způsobeným zvýšením výkonu. Takto provedená vylepšení umožňují využít Raspberry pro mnohem náročnější aplikace a poskytují tak možnost významného potencionálního upgradu navrhovaného přijímacího systému. [26]

Zvýšení výkonu má za však následek zhoršení schopnosti odolávat celkovému přehřívání zařízení při vyšším zatížení. Obecně je nutné zajistit vhodnou formu chlazení tak, aby nejen nedošlo k poklesu výkonu při vyšší teplotě, ale především, aby nedošlo přímo k poškození zařízení. Chladit je nutné každý model od Raspberry při vyšším zatížení, ale čtvrtý model je v tomto ještě náročnější, protože obecně platí, že čím vyšší výkon – tím vyšší teplota. [26]

Způsobu možných chlazení je celá řada. Nejednoduší formou a základem pro každé použití je pasivní chladič. Ten se pevně spojí s procesorem a docílí tak lepší výměny tepla mezi procesorem a okolním vzduchem. Druhou možností je instalace ventilátoru, ideálně však společně s pasivním chladičem. Tato možnost dokáže ochladit zařízení až o několik desítek stupňů. Ideální je oba dva způsoby zkombinovat ještě s vhodným výběrem obalu na samotné zařízení. To by mělo splňovat nejen vhodnou ochranu zařízení proti vnějším vlivům, ale i schopnost dobrého odvodu horkého vzduchu, kupř. vhodně navrženými ventilačními otvory.

4.1.3 Zvolený anténní systém

Další bodem je zvolení výkonné antény schopné zachytit VKV komunikace v leteckém pásmu. Konkrétně pak byla pro tyto účely použita anténa od japonské firmy Diamond, model D-777 (viz kapitola 3.10.1). Standardně dodávaná anténa k DVB-T tuneru totiž ani zdaleka nedosahuje požadovaných parametrů, který by byly pro zachycení hlasové komunikace třeba. K čemu však posloužila naprosto dostatečně, bylo k testování funkčnosti jednotlivých řešení. Samozřejmě pouze prostřednictvím FM radiového vysílání, které díky jeho silnému pokrytí, neměla problém zachytit.

Se znalostmi o dostupném hardwaru pro zamýšlenou přijímací stanici je možné přistoupit k návrhu softwarového řešení.

4.2 Navrhovaný software

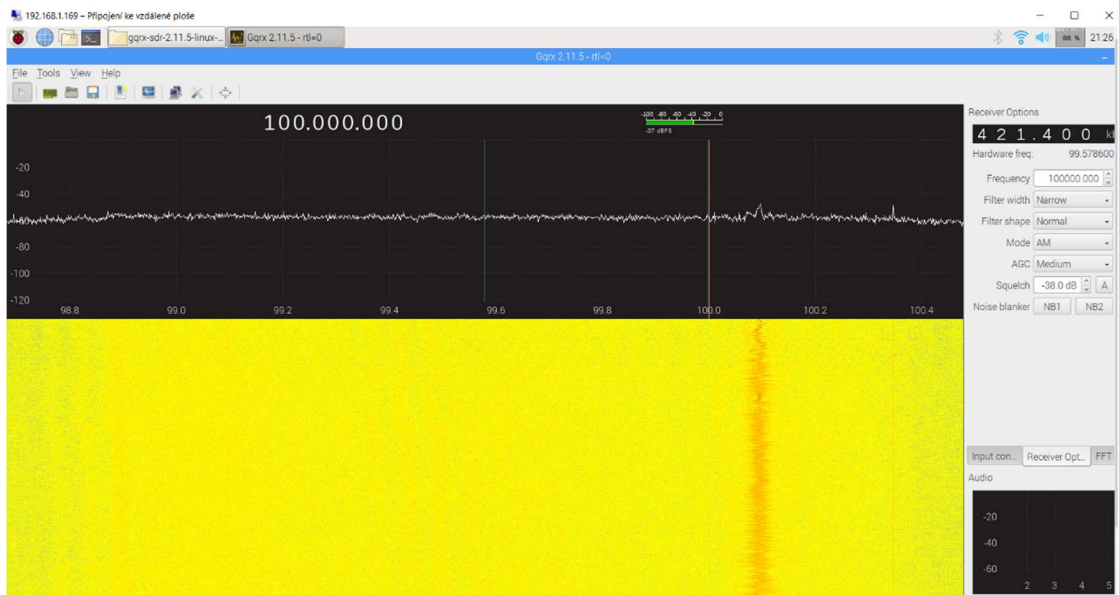
Před instalací veškerého softwaru je nutné stažení a instalace ovladače na Raspberry Pi 3 B+, aby bylo možné využívat levný DVB-T tuner jako plnohodnotné SDR. Jak tato operace probíhá je podrobně rozebráno v kapitole 5. Realizace systému.

Jako první byla otestována možnost instalace a ovládání softwaru přímo na Raspberry. Tento postup byl zvolen hlavně proto, aby ověřil správnou funkčnost a zdařilou instalaci ovladače nutného pro přijímač. Bylo nutné instalovat kompatibilní program s operačním systémem Raspberry. Zde se provedla instalace dvou programů, a to konkrétně GQRX a CubicSDR. Samozřejmě existuje i spousta dalších programů, ale ne všechny podporují použití na

Raspberry a používají se primárně po připojení přijímače přímo do počítače – pro platformu Windows. Ostatně stejným způsobem jako výše uvedené programy lze použít i několik programů, které jsou zmíněny až při druhém způsobu možné realizace. Je totiž možné u nich nastavit odkud mají brát přijímaná data, takže si uživatel může vybrat, jestli daný program použije přímo k příjmu dat z vysílače, nebo skrze webový server.

Z hlediska přístupu k poslechu je tento způsob uživatelsky velmi intuitivní a za hlubší zmínku určitě stojí i program GQRX, na obrázku 20. Jeho instalace je velice dobře popsána, a pokud by o tomto způsobu realizace uživatel uvažoval, určitě by se na základě zkušeností z testování dal doporučit. Tento typ přijímacího systému by pak jistě měl své využití, kde by jeho hlavní přednost mohla být především v mobilitě. K Raspberry by se jednoduše dala dokoupit dotyková obrazovka, zajistit zdroj napájení z baterie a k dispozici by tak mohl být lehce přenosný přístroj pro analýzu různých signálů.

Za největší výhodu lokálního přístupu lze označit nezávislost na internetovém připojení, neboť data se nám nikam prostřednictvím internetu nepřenášejí. Na druhé straně tento přístup skýtá mnoho nevýhod. Ať už se jedná o nutnost připojení ovládacích prvků a zobrazovacího zařízení k Raspberry, tak pak rovněž také fakt, že běh takového programu dost významně zatěžuje operační paměť Raspberry. Bylo by proto lepší tuto zátěž přenést na výkonnější hardware – počítač. Existuje však i způsob instalace a teoreticky i používání programů bez nutnosti připojení ovládacích a zobrazovacích periférií přímo k Raspberry. Lze toho docílit tímto způsobem, že se k Raspberry zřídí vzdálený přístup za pomoci SSH, buď k příkazovému řádku, nebo se provede nasdílení plochy pomocí programu XRDP. Tento přístup vyžaduje připojení k síti ethernet. A vzniká zde ještě navíc nutnost dořešit absenci přenosu zvuku při pokusu o poslech přijatého signálu tímto způsobem.



Obrázek 20: Programu GQRX instalovaný a ovládaný přímo na Raspberry (zdroj: autorův archiv).

Na základě všech zmíněných skutečností se tento přístup pro realizaci požadovaného přijímacího systému nehodí, neboť schopností požadovaného systému by měl být příjem letecké komunikace anténou umístěnou na Strahově a jeho poslech v prostorách školy, což by tento způsob neumožnil. Navíc by pro koncového uživatele bylo k dispozici ovládání skrze SSH, které vyžaduje vyšší uživatelskou náročnost.

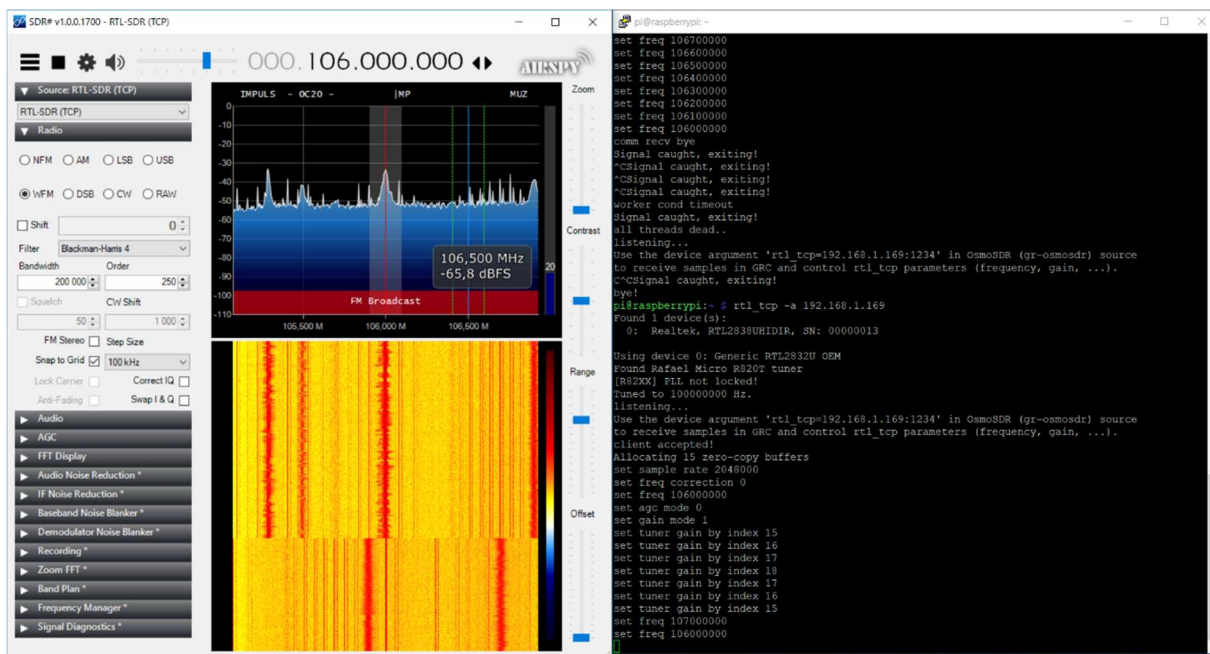
Druhou možností řešení je, že výsledný program pro poslech si nainstaluje koncový uživatel a Raspberry zde „pouze“ slouží k přenosu dat, kdy přijatá data distribuje skrze síť v rámci TCP/IP spojení tam, kam je potřeba. Požadavek na část potřebného výkonu se tak z Raspberry přesune přímo na počítač posluchače. Rovněž zde není nutné mít připojené ovládací periferie k Raspberry. Pro ovládání bezpečně postačí příkazový řádek Raspberry, ke kterému se použije již zmíněný přístup skrze SSH, například za pomoci programu Putty. Je proto možné Raspberry s přijímačem umístit na vzdálenější místo. Cílový posluchač už jen následně musí v programu, který si instaluje na svůj počítač, zvolit způsob příjmu dat a po propojení může poslouchat hlasovou komunikaci i ze vzdáleného přijímače. Programů pro tento účel je celá řada, například: SDRSharp, HDSDR, Linrad či SDR-RADIO.COM V3. [19]

Uvedené programy se pak liší uživatelským prostředím a hloubkou do jaké lze přijímaný signál analyzovat, či zpracovat. Výběr je široký i vzhledem k tomu, že většina z nich je kompatibilní se systémem Windows, což je nejrozšířenější operační systém pro PC. Výběr tak víceméně záleží na preferencích jednotlivých uživatelů, jaký program si zvolí.

Vzhledem ke zkušenostem získaných během testování tohoto způsobu realizace, by se uživateli, kterého zajímá pouze poslech hlasové komunikace, dal doporučit program

SDRSharp. Ostatní programy se samozřejmě k tomuto účelu dají rovněž využít, ale program volně dostupný od společnosti Airspy je v tomto ohledu nejvíce uživatelsky přístupný. U programu HDSDR, který je mu velice podobný, je jen několik funkcí navíc, které uživatel při tomto typu použití nemusí potřebovat. Navíc je jeho instalace složitější. Program Linrad pak poskytuje detailní přehled a informace o přijímaném signálu a hodil by se nejspíše při odposlechu nějaké šifrované komunikace, kterou bychom se snažili rozklíčovat. Jelikož však civilní letecká komunikace není šifrována, je takto složitý program pro uživatele zbytečnou variantou.

Na obrázku 21 je vidět konkrétně program SDRSharp vyvíjený firmou Airspy, přesněji v jeho levé části. Pravá část je uživatelské prostředí programu Putty, kde je zobrazeno, jak se změna v uživatelském prostředí projeví v příkazovém řádku Raspberry.



Obrázek 21: Program SDRSharp a Putty (zdroj: autorův archiv).

Volba tohoto přístupu má však i jednu nevýhodu. Tou je nutnost, aby koncový uživatel měl instalovaný příslušný software. Stejně tak by tento způsob neumožňoval volný přístup uživatele k poslechu. Ideálním řešením se proto jeví využití takové aplikace, která dovolí sdílet data skrze internetovou síť a zároveň umožňuje snadný přístup a ovládání pro uživatele. Tyto požadavky splňují aplikace, jež toto dovolují v případě, kdy má koncový uživatel instalován pouze webový prohlížeč, neboť se jedná o webové aplikace.

Poznámka k programu GQRX. Ten se dá použít i při druhém způsobu realizace, avšak nejedná se o použití čistě jako webserver, ale pouze o vzdálené ovládání. Pro uživatele to pak vyžaduje znalost příkazů, kterými program ovládá. Přenos audia se dá příkazem provést za pomoci tzv.

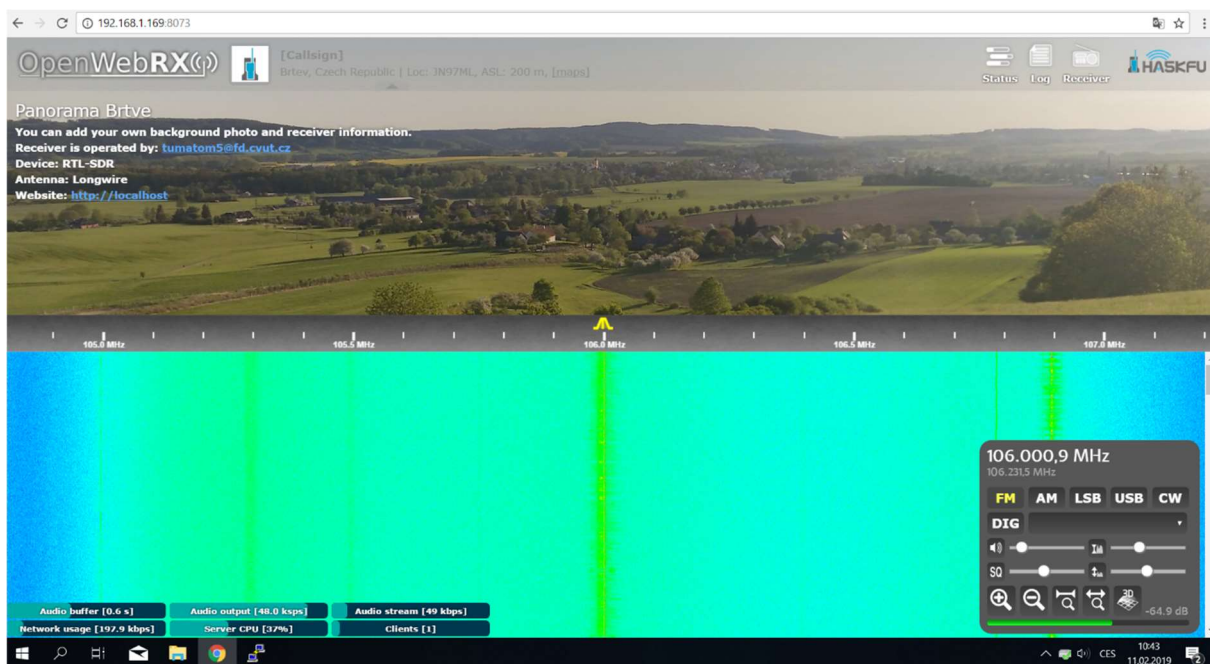
protokolu UDP. Přijímaný zvuk lze následně poslouchat skrze běžně dostupný přehrávač, např. VLC. [19]

Třetí testovaná varianta, která požadavkům na navrhovaný přijímací systém vyhoví nejlépe, je variantou, která byla vybrána k samotné realizaci, jelikož cílem této práce je návrh a realizace přijímacího systému, který umožní poslech letecké komunikace mezi pilotem a řídícím. V ideálním případě tak, aby se anténa s přijímačem mohla umístit na vhodné místo – střecha kolejí Strahov. A aby byl zároveň umožněn poslech této komunikace z pohodlí kanceláře či učebny, bez nutnosti instalace softwaru koncovým uživatelem. Tento způsob realizace rovněž umožňuje připojení a poslech několika uživateli v jeden moment, což je i vzhledem k možnosti využití pro navrhovaný systém žádoucí.

Mezi webovými aplikacemi je možné jmenovat dvě, které stojí za zmínku: jednou z variant je WebSDR, která funguje od roku 2008 a jedná se o projekt vzniknuvší na univerzitě sídlící v nizozemském Twentu, tou druhou a přístupnější aplikací je varianta, nazývaná se OpenWebRX, jež vznikla v roce 2014 v rámci jednoho z témat zpracovaného studentem na univerzitě v Budapešti. Je tak patrné, že trend v této oblasti udávají přední evropské univerzity. [5] [27]

Pro realizaci navrhovaného systému by určitě byly vhodné obě aplikace. Jelikož je však rozhodující faktorem co možná nejjednodušší uživatelská ovladatelnost, byla pro realizaci zvolena aplikace OpenWebRX, která nabízí přehlednější a méně náročné ovládací prvky. Rovněž se musí zohlednit skutečnost, že je tato aplikace prezentována jako open source a je o 6 let novější než její alternativa. Vše podtrhuje lepší grafické zpracování, které má jednoznačný podíl na tom, že i pro neznalého posluchače, vypadá OpenWebRX přehledněji a přívětivěji než WebSDR. [5]

Na obrázku 22 vzniklého během testování je přehledné uživatelské prostředí krásně patrné.



Obrázek 22: Webové rozhraní programu OpenWebRX (zdroj: autorův archiv).

Použití tohoto způsobu je, jak již bylo zmíněno, výhodné především proto, že je možné, aby bylo připojeno více uživatelů v jeden okamžik. U předchozích způsobů byl možný pouze jeden aktivní uživatel, který měl možnost poslechu. Možnost připojení více uživatelů je u webové aplikace zprostředkována díky tomu, že se přijímač naladí pevně na určitou frekvenci. Připojení uživatelé pak pouze vybírají frekvenci, jenž je součástí zobrazitelného pásma přijímače, a kterou si pomocí webové aplikace zvoleným způsobem zpracují. U předchozích variant sestavení přijímacího systému docházelo vždy ke změně naladěné frekvence přímo přijímačem. Je důležité zmínit, že pevným zvolením přijímačem naladěné frekvence se uživatelům nabídne pouze úzké pásmo frekvencí, mezi kterými mohou ladit. Šířka tohoto pásma je dána výkonem dostupného DVB-T přijímače a to konkrétně 2,4 MHz. Naladění jiné frekvence, která není obsažena v zobrazitelném pásmu, pak není pro koncového posluchače možné. Pro správce přijímacího systému však změna pevně naladěné frekvence přijímače, a tím i posun pásma zobrazených frekvencí, možná je. Nicméně to vyžaduje restartování spuštěného serveru a zadání hodnoty nové frekvence, na kterou se má přijímač naladit. Vše se musí provést pomocí vzdáleného přístupu v příkazovém řádku Raspberry. Změna frekvence pak není časově náročná, ale žádnému uživateli toto omezení nikdy nedovolí poslechnout si frekvenci, která je od pevně naladěné frekvence přijímače rozdílná o více jak 1,2 MHz.

I přes toto omezení se však jedná o nejlepší možnou variantu, jak co nejlépe využít dostupný výkon DVB-T tuneru a možný nedostatek šířky zobrazitelného pásma by se dal vyřešit pouze výměnou přijímače za výkonnější model, samozřejmě s ohledem na jeho požadavky kladené

na podpůrný hardware. Zobrazení spektra širokého jako celé pásmo VKV hlasové komunikace, by pak určitě nepokryl mini počítač Raspberry, jak je tomu v případě navrhovaného systému.

Čtvrtou možností, jak lze k návrhu systému přistoupit, je použití programu RTLSDR-Airband, umožňujícího výběr konkrétních hodnot snímaných frekvencí a ty následně za pomoci dalšího programu zprostředkovat k poslechu. Tento způsob využívá principu streamování audia, kdy program přijímá data pouze na zvolených frekvencích, provede vybraný způsob demodulace a následně je, dle nastavených výstupů, předává program, jenž se stará o jejich distribuci skrze síť. Jednou z vhodných služeb pro zprostředkování je volně dostupná služba Icecast, která umožňuje vytvoření streamovacího serveru přímo na Raspberry. Koncový uživatel pak k použití musí mít instalovaný webový prohlížeč a na příslušné webové adrese si vybere, který audio stream chce poslouchat. Nutností je, že k poslechu je třeba mít instalovaný program umožňující přehrávání audia. Z hlediska použití tento způsob realizace umožňuje koncovému uživateli poslech jen předem navolených frekvencí a neumožňuje způsob výběru modulace, či přeladění na libovolnou frekvenci v přijímaném pásmu přijímače, například jako u programu OpenWebRX. [12]

Jedná se o způsob řešení, které je podobné řešení s programem OpenWebRX, myšleno z hlediska nutné programové výbavy koncového uživatele, a proto je tento způsob řešení zařazen do stejné podkategorie viz. kapitola 4.

Program RTLSDR-Airband má dvě základní možnosti konfigurace. Jednou je tzv. skenovací mód, při kterém se programu zadají frekvence, mezi kterými má hledat aktivní signál. Tyto frekvence pak mohou být od sebe více vzdálené a není zde omezení v podobě šířky přijímaného pásma. Celé to funguje tak, že v tomto módu program skenuje zadaný seznam frekvencí (až 5 za 1 sekundu) a pokud někde zachytí signál, nechá tento kanál otevřený a nepřeladí ihned dál, přeladí až tehdy, když dojde k poklesu intenzity přijatého signálu. Tento fakt by mohl zapříčinit, že v případě vysílání dvou frekvencí v jeden okamžik, by při vybrání špatné frekvence nebyl umožněn poslech, protože přijímač by byl stále naladěn na frekvenci jinou. Z tohoto důvodu by bylo lepší použití módu s názvem multi-channel. Zde nemůže dojít k výše zmíněnému problému. Nicméně existuje zde omezení, stejné jako u programu OpenWebRX a totiž, že ačkoliv je možné vytvořit libovolný počet audio streamů pro libovolný počet frekvencí, tak všechny z nich musí být obsaženy v pásmu, které dokáže přijímač najednou zachytit. V tomto případě by to bylo velmi limitující, protože šířka pásma by mohla být 2,4 MHz při použití jednoho DVB-T tuneru. [12]

Co by však mohlo činit tento způsob aplikace zajímavější by bylo dokoupení dalšího, případně dalších DVB-T tunerů. Ty by díky tomuto programu mohli fungovat nezávisle na sobě a každý

z nich by zaujímal jinou část frekvenčního spektra. Díky sestavě 3 takovýchto zařízení by bylo možné pokrýt většinu frekvencí zachytitelných na LKPR. Rozdělení těchto frekvencí je znázorněno v tabulce 5. V její horní části je návrh frekvencí, na které by přijímače byly naladěny. V dolní části následně jakou frekvenci by jednotlivé přijímače mohly zachytit – zvýrazněné zeleně (rozdíl menší než 1,2 MHz).

Tabulka 5: Návrh pokrytí frekvencí na LKPR třemi přijímači typu DVB-T tuner (zdroj: [1]).

Přijímač číslo	Naladěn na frek. [MHz]
1	118,000
2	121,000
3	135,000

Služba	Označení	Frekvence [MHz]	Rozdíly frekvencí [MHz]		
			1	2	3
APP	PRAHA APPROACH	120,530	2,530	-0,470	-14,470
APP	PRAHA APPROACH	127,580	9,580	6,580	-7,420
APP	RUZYNĚ APPROACH	119,010	1,010	-1,990	-15,990
APP	RUZYNĚ INFORMATION	118,310	0,310	-2,690	-16,690
APP	Emergency FREQ.	121,500	3,500	0,500	-13,500
APP	Supplementary FREQ.	136,080	18,080	15,080	1,080
TWR	RUZYNĚ TOWER	134,560	16,560	13,560	-0,440
TWR	RUZYNĚ DELIVERY	120,060	2,060	-0,940	-14,940
TWR	RUZYNĚ GROUND	121,910	3,910	0,910	-13,090
TWR	Emergency FREQ.	121,500	3,500	0,500	-13,500
TWR	Supplementary FREQ.	118,110	0,110	-2,890	-16,890
ATIS	RUZYNĚ ATIS	122,160	4,160	1,160	-12,840
HZS	RUZYNĚ FIRE	121,610	3,610	0,610	-13,390

Tento způsob realizace by při mírně vyšších nákladech oproti řešení s jedním DVB-T tunerem, a zároveň při nižších nákladech, než při pořízení výkonnějšího zařízení, poskytl velmi zajímavou alternativu, jak realizovaný systém rozšířit na co největší šířku sledovatelného pásma. Cenovou náročnost této realizace (v tabulce varianta B) oproti aktuální variantě (v tabulce varianta A) lze najít v tabulce 6. V nákladech by bylo nutné počítat nejen s nákupem dvou dalších zařízení, ale i s nákupem redukci, kabelů, koncovek a aktivního rozbočovače (společně se zdrojem napájení) pro rozdělení signálu na 3 zařízení. Zmíněné rozdělení má nicméně vždy za následek výrazné snížení kvality přijímaného signálu, a to i v případě použití aktivního rozbočovače.

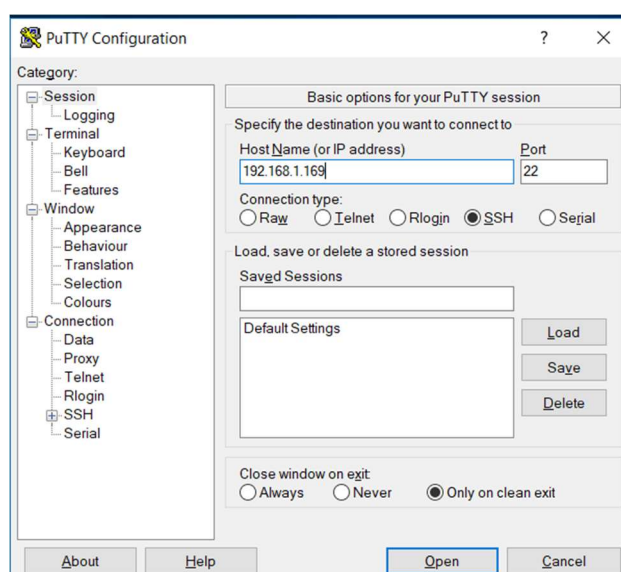
Tabulka 6: Cenové srovnání variant (zdroj: [8] [18] [25] [29]).

Položka	Ks	Cena/ks	Cena celkem
Pro variantu A i B			
Raspberry Pi 3 B+ (včetně SD karty)	1	1 779 Kč	1 779 Kč
Chladicí modul pro Raspberry	1	389 Kč	389 Kč
DVB-T tuner (zahraniční nákup)	1	300 Kč	300 Kč
Redukce BNC/SMA Z/V	1	66 Kč	66 Kč
Redukce MCS/SMA V/Z	1	65 Kč	65 Kč
Mezisoučet variantu A:			2 599 Kč
Pouze pro variantu B			
DVB-T tuner (zahraniční nákup)	2	300 Kč	600 Kč
Aktivní rozbočovač trojnásobný	1	505 Kč	505 Kč
Zdroj pro aktivní rozbočovač	1	200 Kč	200 Kč
Doplatek za BNC konektory k rozbočovači	1	100 Kč	100 Kč
Kabel koaxiální 50 ohm – 1 m	2	45 Kč	90 Kč
Redukce BNC/SMA Z/V	2	66 Kč	132 Kč
Redukce MCS/SMA V/Z	2	65 Kč	130 Kč
BNC konektory - kabel	6	32 Kč	192 Kč
Celková cena varianty B:			4 548 Kč

Ze zmíněného cenového porovnání lze konstatovat, že cena této realizace by nedosahovala ani jednou tak vysoké částky, a přitom by teoreticky nabízela trojnásobnou šířku sledovatelného pásma. Došlo by tak v podstatě ke zlevnění výsledné realizace při přepočtu na počet možných přijatých frekvencích vzhledem k celkové ceně.

5. Realizace systému

Realizace přijímacího systému, či přijímací stanice, je podmíněna a složena z několika kroků. Mezi které patří především instalace vhodných doplňků, knihoven a programů na mini počítač Raspberry, který bude společně s přijímačem umístěn na Strahově. Veškerá instalace byla provedena za pomoci konzole-příkazového řádku přes vzdálený SSH přístup za pomoci programu Putty (obrázek 23). Tento způsob instalace není po pochopení základních příkazů složitý a byl zvolen především proto, že při výsledné instalaci vzniká možnost ovládnutí a konfigurace systému i bez nutnosti osobního kontaktu s přijímačem. Popis instalace je uveden pro zařízení, které obsahuje pouze nainstalovaný OS bez jakýchkoliv úprav. Její průběh je popsán v několika následujících krocích.



Obrázek 23: Vzdálený přístup za pomoci programu Putty (zdroj: autorův archiv).

5.1 Přípravná fáze Raspberry

V první řadě je nutný update aktuálního systému Raspberry. To je provedeno za pomoci příkazu:

```
sudo apt-get update
```

Výraz „sudo“ na začátku příkazu lze chápat jako „povolení administrátora“, přirovnat by se to nejlépe dalo k vyskakovacímu dialogovému oknu, kterým se uživatelsky používanější systém Windows ptá, zdali chcete ve svém operačním systému povolit změny.

Po provedení updatu je nutná instalace nástrojů, které významně usnadní instalaci dalších programů. Patří mezi ně instalace systému Git – správce verzí, Cmake – automatizace překladu na různé platformy a Build-essential – pro sestavování stažených balíčků. Vše se provede za pomoci obdobného příkazu jako výše, pouze s tím rozdílem, že se rovnou provede

instalace a to tak, že do příkazu se před název souboru přepíše *install*. Nástroj je následně stažen a instalován. Například pro instalaci nástroje Git, příkaz vypadá:

```
sudo apt-get install git
```

Posledním krokem přípravné fáze našeho Raspberry je instalace C knihovny libusb-1.0-0.dev, která umožňuje kontrolu nad zařízeními připojenými skrze USB. Díky tomu je umožněno datové komunikaci Raspberry s našim DVB-T tunerem. Stažení a instalace se provede obdobným příkazem jako výše, pouze se změní název stahovaného doplňku. [19]

5.2 Instalace gitu pro RTL-SDR

Tato instalace je nutná proto, aby bylo možné běžně dostupný DVB-T tuner ovládat za pomoci Raspberry jako připojený přijímač. Rovněž se instalací tohoto „ovladače“ docílí, že se dá použitý přijímač použít jako plnohodnotné SDR a není už následně určen pro příjem DVB-T signálu.

K této instalaci poslouží git (v tomto případě ovladač), který je volně dostupný, díky již změnovému projektu Osmocom. Nejdříve se provede jeho stažení, a to za pomoci příkazu:

```
git clone git://git.osmocom.org/rtl-sdr.git
```

Následně je nutné se v rozhraní příkazového řádku přesunout do adresáře staženého gitu, a to za pomoci linuxového příkazu *cd rtl-sdr/* a v tomto adresáři vytvořit za pomoci příkazu *mkdir* složku s názvem *build*. [20]

Po přesunutí do nově vytvořené složky se program nainstaluje za pomoci následující sekvence příkazů:

```
cmake ../-DINSTALL_UDEV_RULES=ON
```

```
make
```

```
sudo make install
```

```
sudo ldconfig
```

Jako následující krok se provede nakopírování přiloženého souboru, mezi pravidla, přímo do adresáře samotného operačního systému Raspberry. Slouží k tomu příkaz *cp*, kdy jako první je uveden kopírovaný soubor a jako druhá položka místo, kam se má nakopírovat. Konkrétně příkaz vypadá:

```
sudo cp ../rtl-sdr.rules /etc/udev/rules.d
```

Následně je nutné ještě přijímači „zakázat“ příjem DVB-T. To se provede vytvořením textového souboru přímo v konfiguračních souborech operačního systému. Konkrétně v adresáři

/etc/modprobe.d. Do vytvořeného textového souboru se vepíše příkaz zakazující použití DVB-T: *blacklist dvb_usb_rtl28xxu*. A soubor se uloží pod názvem: *blacklist-rtl.conf*. V případě neprovedení posledních dvou kroků by nebylo možné náš přijímač použít jako SDR. [20]

Jako poslední krok se provede restart systému, příkazem *reboot*, a otestuje se správnost instalace. K tomuto účelu slouží příkaz:

```
rtl_test -t
```

Pokud je instalace úspěšná, mělo by Raspberry vypsat údaje, které jsou viditelné na následujícím obrázku 24. [20]

```
pi@raspberrypi:~ $ rtl_test -t
Found 1 device(s):
  0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN: 00000013

Using device 0: Generic RTL2832U OEM
Found Rafael Micro R820T tuner
Supported gain values (29): 0.0 0.9 1.4 2.7 3.7 7.7 8.7 12.5 14.4 15.7 16.6 19.7
 20.7 22.9 25.4 28.0 29.7 32.8 33.8 36.4 37.2 38.6 40.2 42.1 43.4 43.9 44.5 48.0
 49.6
[R82XX] PLL not locked!
Sampling at 2048000 S/s.
No E4000 tuner found, aborting.
```

Obrázek 24: Vypsané údaje Raspberry po zadání testovacího příkazu (zdroj: autorův archiv).

Výpis na prvních dvou řádcích informuje o nalezení připojeného zařízení. Další podstatná informace se pak nachází na šestém řádku, který informuje o funkčnosti tuneru, kterým je přijímač vybaven. Předposlední řádek pak vypisuje frekvenci, s jakou rychlostí je prováděno vzorkování. Nyní je možné na Raspberry použít vybranou aplikaci, která umožní poslech hlasové komunikace.

5.3 Použití OpenWeb RX

Zvolenou aplikací pro realizaci je OpenWeb RX. Zprovoznění této aplikace na Raspberry je podmíněno dvěma kroky.

Jedním z kroků je stažení podpůrného softwaru a jeho nainstalování. Jedná se o nástroj CSDR, který aplikace OpenWebRX používá jako demodulátor, a také k vykreslení zobrazení sledovatelného pásma tzv. „waterfall display“. Jeho stažení se provede za pomoci příkazu *git clone* z místa, kde je dostupný. Instalace se následně provede v jeho adresáři pomocí již zmíněných příkazů: *make* a *sudo make install*. [5]

Druhým z kroků je stažení samotné aplikace OpenWebRX opět pomocí příkazu *git clone* z místa, kde je dostupný. Následně už se jen pomocí příkazu *cd* stačí přesunout do adresáře staženého programu a spustit ho za pomoci příkazu:

`./openwebrx.py`

Tímto je zprovoznění programu na Raspberry hotové, nyní už by stačilo na počítači v internetovém prohlížeči zadat adresu a zahájit poslech. V tomto případě by však bylo umožněno dohledání přijímacího systému pouze na naší lokální síti (viz. Obrázek 22). Stejně tak by nemusela vyhovovat defaultně nastavená frekvence přijímače, proto je nutné provést nastavení web serveru v konfiguračním souboru. [5]

5.4 Nastavení web serveru OpenWebRX

Pro nastavení parametrů serveru slouží konfigurační soubor, který je k nalezení v adresáři programu. Ten se ze vzdáleného přístupu k příkazovému řádku otevře za pomoci příkazu `nano`. Konkrétně pak kompletně napsaný příkaz vypadá takto:

```
nano ../openwebrx/config_webrx.py
```

Zobrazí se soubor o několika desítkách řádků, kde jsou nejvíce důležité tři oblasti:

1. Nastavení připojení.
2. Nastavení uživatelského rozhraní.
3. Nastavení přijímače.

5.4.1 Nastavení připojení

Této položky se v konfiguračním dokumentu týkají dvě podoblasti. V té první (obrázek 25) se nastavuje jaký webový port webserver využije – v případě realizovaného systému se nechá hodnota 8073. Další věc, která se zde musí nastavit je položka `server_hostname`, kde se musí zadat IP adresa serveru – v tomto případě síťovou IP adresu Raspberry (v základní konfiguraci je totiž server sdílen pouze na lokální síti). Třetím parametrem je maximální možný počet posluchačů, který se z výkonnostních důvodů sníží na 5, aby se předešlo přetížení serveru.

```
# ==== Server settings ====  
web_port=8073  
server_hostname="localhost"  
max_clients=20
```

Obrázek 25: Nastavení připojení serveru (zdroj: autorův archiv).

Aby realizovaný server nebyl dostupný pouze lokálně a byl tak vyhledatelný na seznamu přijímačů OpenWebRX, je nutné ještě provést úkony k zalistování serveru. První, co se musí provést, je vyplnit unikátní kód, který se získá při vyplnění formuláře na stránkách aplikace pro zaregistrování realizovaného přijímače. Poté co se vyplní kód do kolonky: `sdrhu_key = ""`, tak už jen stačí, aby se hodnota uvedená u řádku: `sdrhu_public_listing`, změnila z `False` na `True` a realizovaný přijímač je dostupný online (obrázek 26). [5]

```
# ===== sdr.hu listing =====  
sdrhu_key = ""  
sdrhu_public_listing = False
```

Obrázek 26: Povolení k zalistování přijímače (zdroj: autorův archiv).

5.4.2 Nastavení uživatelského rozhraní

Nastavované hodnoty v této oblasti, pro přehlednost zobrazeny na obrázku 27, slouží k doplnění a zobrazení veškerých informací o konkrétním přijímači. Ať už se jedná v pořadí z vrchu: název přijímače, lokace umístění přijímače, typ přijímače, typ antény, kontakt na správce serveru a GPS pozice přijímače.

```
# ===== Web GUI configuration =====  
receiver_name="[Callsign]"  
receiver_location="Budapest, Hungary"  
receiver_gra="JN97ML"  
receiver_asl=200  
receiver_ant="Longwire"  
receiver_device="RTL-SDR"  
receiver_admin="example@example.com"  
receiver_gps=(47.000000,19.000000)  
photo_height=350  
photo_title="Panorama of Budapest from Schönherz Zoltán Dormitory"  
photo_desc=""  
You can add your own background photo and receiver information.<br />  
Receiver is operated by: <a href="mailto:%[RX_ADMIN]">%[RX_ADMIN]</a><br />  
Device: %[RX_DEVICE]<br />  
Antenna: %[RX_ANT]<br />  
Website: <a href="http://localhost" target="_blank">http://localhost</a>  
""
```

Obrázek 27: Nastavení uživatelského rozhraní (zdroj: autorův archiv).

Tyto uvedené údaje není bezpodmínečně nutné vyplňovat, nemají na funkci systému vliv, ale určitě není od věci koncovému uživateli poskytnout informaci, s jakým přijímacím systémem se setkává, a kde se přijímací zařízení nachází. Dokonce je zde možná změna pozadí a částečně to tak dovoluje přizpůsobit si grafické prostředí pro svoji potřebu.

5.4.3 Nastavení přijímače

Tento bod nastavení je z hlediska realizace velmi zásadní. Skýtá několik položek, které se dají nastavit, viz obrázek 28, ať už se jedná o rychlost či velikost Fourierovy transformace, či případnou kompresi zvuku. Pro realizovaný přijímací systém je důležité věnovat se hlavně dvěma parametrům: prvním je vzorkovací frekvence – *samp_rate*, která je už v základu nastavena pro realizovaný přijímač tak jak má, a proto hodnotu 2400000 necháme nezměněnou. Hodnotu, která se však určitě budeme měnit, je nastavení frekvence, na kterou je přijímač naladěn. Změní se proto hodnota u položky: *center_freq* ze 144250000 na frekvenci

blíží se některé z hodnot uvedených v tabulce 7, jenž vychází z hodnot zjištěných v Tabulka 5.

Tabulka 7: Vhodné frekvence pro nastavení přijímače (zdroj: [28]).

Naladěná frekvence	Počet zachytitelných frekvencí
118,000 MHz	3
121,000 MHz	7
135,000 MHz	2

Tou bude při instalaci frekvence 134.560.000 Hz. Což je frekvence, na které probíhá vysílání z věže na letišti Václava Havla v Praze. V případě budoucí potřeby je možností stejným způsobem tuto frekvenci změnit, protože jak je již uvedeno výše, koncový uživatel může vždy naladit pouze frekvenci, která není rozdílná o více jak 1,2 MHz.

```
# ===== DSP/RX settings =====
fft_fps=9
fft_size=4096
fft_overlap_factor=0.3
samp_rate = 2400000
center_freq = 144250000
rf_gain = 5
ppm = 0

audio_compression="adpcm" #valid values: "adpcm", "none"
fft_compression="adpcm" #valid values: "adpcm", "none"

digimodes_enable=True #Decoding digimodes come with higher CPU usage.
digimodes_fft_size=1024

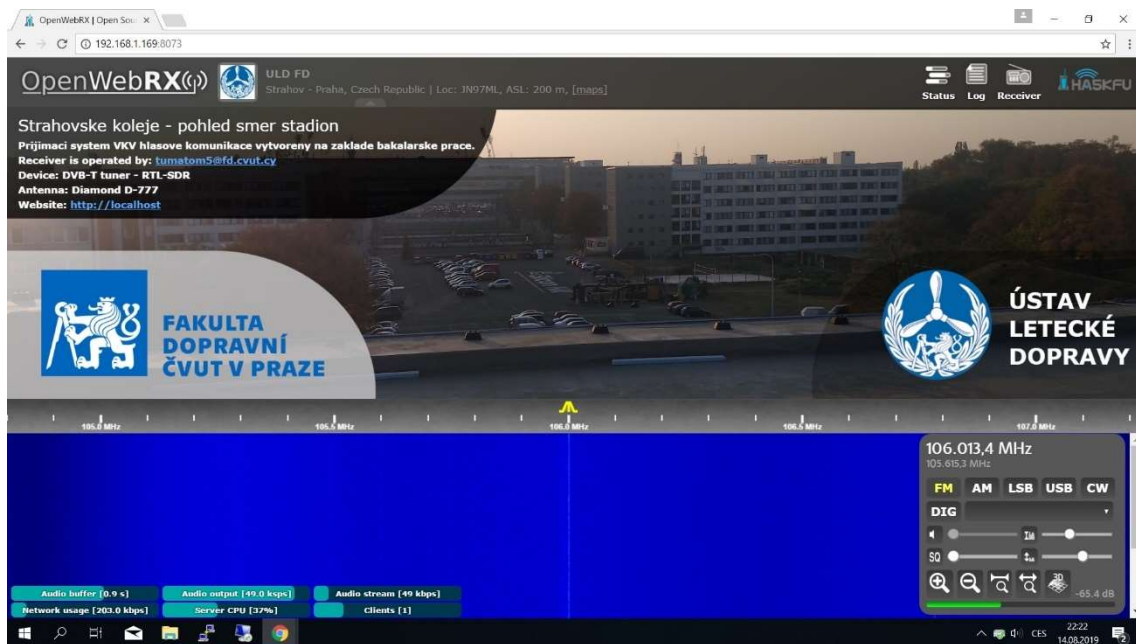
start_rtl_thread=True
```

Obrázek 28: Nastavení frekvence přijímače (zdroj: autorův archiv).

Takto nastavený přijímací systém se otestoval v domácích podmínkách na FM rádiu se standardní anténou přiloženou k DVB-T tuneru (viz. obrázek 29), a protože se plně prokázala funkčnost tohoto systému, lze realizovaný přijímací systém považovat za připravený k instalaci na finální místo. Výsledné uživatelské rozhraní přijímací stanice je zobrazeno na obrázku 30.



Obrázek 29: Sestava přijímací stanice během testování (zdroj: autorův archiv).



Obrázek 30: Výsledné uživatelské rozhraní přijímací stanice (zdroj: autorův archiv).

5.5 Instalace systému

5.5.1 Místo instalace

Jako lokalita umístění přijímače a antény byly vybrány prostory pražských Strahovských kolejí, a to hned z několika důvodů. V současné době má totiž Ústav letecké dopravy zřízen vstup do bloku 11, a to jak do vnitřních prostor, tak i na střechu. Všechno díky vstřícnému přístupu Správy účelových zařízení ČVUT. Rovněž je zde leteckému Ústavu dovoleno využívat internetového připojení, které mu zprostředkovává kolejní Klub Silicon Hill. Z hlediska umístění lokality se pak jedná o zajímavé místo, neboť se nachází mimo centrum města směrem k letišti - poskytuje možnost poslechu letecké komunikace při přiblížení a také je v přijatelné dojezdové vzdálenosti v případě provozní nutnosti.

5.5.2 Umístění antény

Je provedeno na střechu kolejního bloku číslo 11. K uchycení antény je využito konstrukce vetknuté ve zdi, na kterou je za pomoci třmenu, nerezového protikusu a samojistných matic uchycena nerezová trubka - vše patrné na obrázku 31. Anténa pro příjem VKV je rovněž za pomoci třmenu, nerezového protikusu a samojistných matic na dvou místech uchycena k již zmíněné nerezové trubce. Kabeláž od antény je svedena vnitřkem budovy až k místu uložení přijímače.



Obrázek 31: Lokalita Strahov – umístění antény (zdroj: autorův archiv).

5.5.3 Uložení přijímací stanice

K uložení hardwaru přijímací stanice bylo použito bloku 11 Strahovských kolejí, a to konkrétně servisní místnosti výtahu. V tomto místě je přijímač ADS-B vlastněný Ústavem letecké

dopravy, a je zde k dispozici prostor pro instalace podobného typu. Tato skutečnost znamená vyřešení několika potenciálních problémů. Je zde totiž vyřešena přípojka elektrické energie pro střídavé napětí 230 V. Takže napájení mini počítače Raspberry lze vyřešit připojením do této sítě skrze adaptér. Druhou výhodou je přítomnost routeru, který poskytne potřebné internetové připojení pro přijímací systém pomocí krátkého ethernetového kabelu. Anténní kabel, který je sveden ze střechy, je za pomoci redukci BNC/SMA a SMA/MCX připojen k DVB-T tuneru. Z důvodů nutnosti zajistit při vyšších výkonech Raspberry chlazení zařízení, bylo na jeho základní desku instalováno aktivní chlazení za pomoci dvou ventilátorů společně s celoplošným pasivním chladičem. Výsledná podoba instalace je zobrazena na obrázcích 32 a 33.



Obrázek 32: Výsledná podoba HW systému při instalaci (zdroj: autorův archiv).



Obrázek 33: Výsledná podobna instalace zařízení (zdroj: autorův archiv).

6. Závěr

Po instalaci přijímače na uvedené místo je tento systém plně v provozu a umožňuje tak poslech letecké komunikace v nastaveném pásmu. Dohledatelný je tento systém skrze internetovou stránku sdr.hu, kde lze přijímací systém vyhledat nejnázvem napsáním hesla ULD do vyhledávacího pole. V současné době takto sestavený systém dovoluje poslechu 2 až 3 leteckých frekvencí. Naladěn je na frekvenci, na které přímo vysílá TWR na LKPR. Na základě otestování je systém funkční. Letecké komunikaci lze rozumět, nedochází k neočekávaným komplikacím. Z hlediska HW zde byly obavy o přehřívání mini PC Raspberry, nicméně díky instalovanému chladiči nebylo zaznamenáno jakékoliv markantní zvýšení teploty, které by mohlo ohrozit zařízení. Instalaci proto lze považovat za zdařilou. Co se však bohužel musí považovat za nedostatek instalovaného systému je jeho šířka sledovatelného pásma. Ta dosahuje maximální šířky 2,4 MHz, která vychází z rozsahu, jímž disponuje DVB-T tuner. I přes tento nedostatek, který se u realizace tímto způsobem nachází, byl tento postup volen proto, že zvolený software OpenWebRX dokáže dostat z dostupného přijímače nejvíce oproti jiným softwarům. V případě nutnosti lze sledovatelné pásmo přijímače posunout skrze vzdálený přístup a naladit tak jiné spektrum a poslouchat i jiné frekvence. Je k tomu však nutný zásah administrátora – koncový uživatel k tomuto kroku logicky nemá přístup.

Pro pokrytí celého pásma letecké komunikace by byl nutný zásah do HW vybavení tzn. pořízení výkonnějšího přijímače. To by samozřejmě znamenalo vyšší náklady na celý systém. Možné způsoby rozšíření bych proto v závěru této práce rád nastínil.

První možností, jak systém realizovat pro širší pásmo s co nejmenší možnou investicí, by bylo zakoupení sestavy DVB-T tunerů, které by se mohly poskládat tak, aby zaujaly například většinu frekvencí dostupných na LKPR. Samotný nákup přijímačů by zde nebyl tak drahou položkou, vyšší finanční náklady by si vyžádaly nutné komponenty pro rozdělení signálu od antény. Mezi nimi lze jmenovat aktivní rozdělovač, jeho napájení, konektory, redukce a kabeláž. Tato možnost by pak zajisté zlepšila poměr mezi cenou a počtem přijatých frekvencí. Podrobněji je rozebrána v kapitole 4.2 včetně hlavního nedostatku, kterým pro zopakování je: vysoká degradace signálu, způsobená jeho rozdělením.

Druhou z možností je pořízení přijímače mnohem výkonnějšího než DVB-T tuner. Zde je však nutné dbát na to, aby se zařízení dalo plnohodnotně použít ve spojení s Raspberry. Takovými zařízeními jsou například LimeSDR mini, nebo zařízení HackRF one. Například zařízení HackRF one lze mimo jeho oficiální distribuci, bez všech přídatných komponent (tzn. pouze jako HW desku) sehnat zhruba za 4 000 Kč. Takto realizované rozšíření by nám zvedlo šířku pásma zhruba desetinásobně, a to až na 20 MHz, které by byly dostačující. Je však nutné počítat s dodatečnými náklady za zapouzdření nekrytého zařízení a případně i jeho chlazení.

Celková cena takovéto realizace by se pak mohla pohybovat okolo 10 000 Kč při započtení nákladů na všechny komponenty systému vyjma antény. Zakoupení tohoto zařízení Ústavem by pak nabízelo možnost užití nejen v tomto systému, ale i prostřednictvím jiných aplikací vzhledem k jeho univerzálnosti.

Třetí možnost zastupuje zcela odlišný přístup. Jednalo by se o zakoupení přijímače, který je dodáván i s podpůrným HW. Při použití zmíněného přístupu by nebylo použito mini PC Raspberry, ale musela by se použít například vývojová deska Beaglebone, pro které je přímo vytvořeno zařízení KiwiSDR. Toto zařízení není v analýze této práce zmíněno z důvodu, že není kompatibilní s dostupným mini PC Raspberry (pro jeho instalaci by bylo nutné použít jiný HW). Nicméně jeho možnost využití pro realizaci systému určenému k poslechu celého leteckého pásma je nutná zmínit. Tento způsob realizace je ale podmíněn instalací několika dalších zařízení, jako je pásmová propust, zesilovač a další. Až poté dokáže zprostředkovat poslech leteckého pásma skrze aplikaci OpenWebRX. Jako řešení pro zamýšlené rozšíření by určitě použít šlo. Nicméně u tohoto řešení je nutné počítat s vysokou cenou za realizaci, kde by náklady jen za pořízení přijímače byly v rozmezí přibližně 7 000 – 8 000 Kč. Výsledná cena včetně všech komponent by výrazně přesahovala částku 10 000 Kč (cena realizace se zařízením HackRF one). S přihlédnutím k výši nákladů by perspektivnější variantou mohlo být zařízení HackRF one, které má k dispozici široký frekvenční rozsah obsahující i letecké pásmo, bez nutnosti instalování dalších komponent.

Vzhledem k uvedeným a zjištěným faktům je nutné nákup lepšího přijímacího systému doporučit. Z mého osobního pohledu to povede k lepšímu využití potenciálu, který realizovaný přijímací systém může mít. Avšak i v současné podobě realizovaný systém skýtá potenciální možnost hned několika způsobů využití. Místy samozřejmě s jistými omezeními, do budoucna však s případným rozšířením i bez těchto omezení. Mezi možnostmi využití lze zařadit několik způsobů:

První z nich by mohlo být používání studenty v rámci výuky. Na Ústavu letecké dopravy je vyučováno hned několik předmětů, které se zabývají oblastí přehledových, navigačních a komunikačních systémů. Přímo se proto nabízí, že by mohla být studentům v rámci některého ze cvičení poskytnuta možnost poslechu VKV hlasové komunikace a předvedení funkcí systému. Pro mnohé z nich by to mohlo vést k ozvláštňení výuky a také k propojení teoreticky nabitých znalostí s těmi praktickými. Některým studentům by pak tato možnost vyzkoušení mohla poskytnou jiný přístup k pochopení dané problematiky.

Druhou možností, která s tou první velmi úzce souvisí je využití opět v rámci cvičení, ale jiným způsobem. Ne pouze jako ukázka, nýbrž by systém mohl sloužit k náslechu frazeologie a struktury zpráv u hlasové komunikace. Jak je již mezinárodním standardem, v letecké

komunikaci se používá angličtina, proto by tento následek mohl přispět ke zlepšení jazykových dovedností studentů jinou formou než je obvyklé.

Třetí možnou aplikací je propojení s leteckým simulátorem instalovaným na ÚLD. Pro takto realizovaný systém se zde nabízí možnost využití v tom, že by pilot používající simulátor naladil příslušnou frekvenci a poslouchal tak skutečnou komunikaci. Ale rovněž by zde u pilota došlo k protřibení smyslů, neboť by pilot nejen řídil letadlo a k dispozici měl zrakový vjem, ale musel by se věnovat i vjemu sluchovému.

V neposlední radě by se tento systém dal využít i jako doplněk přehledového systému založeného na ADS-B. Na přehledové mapě by se dle polohy dalo zvolit letadlo, jehož komunikaci chceme slyšet. Ve webovém rozhraní by se následně naladila frekvence nejbližšího přijímače a mohli bychom zkusit odposlechnout jeho komunikaci s řídícím. Tímto způsobem by určitě šlo tuto komunikaci analyzovat a sestavit tak například harmonogram hlasových pokynů, které pilot dostane během sestupu a přiblížení k letišti. Rovněž by se tímto způsobem dal ověřit i maximální možný dosah realizovaného přijímače.

A samozřejmou možností je využití tohoto přijímacího systému jako výchozího bodu pro další práci. Ať už pro navazující, nebo pro úplně novou. Jak je již zmíněno systém by zajisté šlo rozšířit a tato oblast nabízí velké možnosti. Po osvědčení provozu mnou realizovaného systému by tak mohlo být tématem další práce, jak efektivně celý systém rozšířit. Například pro větší oblast pokrytí, nebo pro rozšíření sledovatelného pásma. Případně vývojem vlastního softwaru, který by umožnil zpracování přijatého signálu jiným způsobem.

Seznam literatury

- [1] ČESKÁ REPUBLIKA. *AD 2-LKPR: LKPR AD 2.18 SPOJOVACÍ ZAŘÍZENÍ LETOVÝCH PROVOZNÍCH SLUŽEB*. In.: 2018. Dostupné také z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/a2-pr-txt1.pdf
- [2] STACEY, Dale. *Aeronautical radio communication systems and networks*. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2007. ISBN 978-0-470-01859-0.
- [3] *Airspy SDR - High Quality Software-Defined Radio* [online]. 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://airspy.com/>
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Amplitudová modulace:: MEF* [online]. In.: 2006 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1389-amplitudova-modulace>
- [5] RETZLER, András. *Blog.sdr.hu/* [online]. 2015 [cit. 2019-08-17]. Dostupné z: <https://blog.sdr.hu/>
- [6] *DIAMOND ANTENNA CORPORATION* [online]. Tokio, Japonsko, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <http://www.diamond-ant.co.jp/english/index.html>
- [7] MAN, Lukáš. *Discone anténa* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/108873/MAN0067_FEI_B2647_2612R059_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Marek Dvorský, Ph.D.
- [8] *Electronics, Cars, Fashion, Collectibles, Coupons and More | eBay* [online]. 2019 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/>
- [9] *ELIX | Radiokomunikační technika - prodej a distribuce* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <http://elix.cz/>
- [10] *E-Shop DD Amtek* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://eshop.ddamtek.cz/>
- [11] *FUNcube Dongle* [online]. 2015 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <http://www.funcubedongle.com/>
- [12] LEMIECH, Tomasz. *GitHub - szpajder/RTLSDR-Airband: RTLSDR AM demodulator, support multiple channels per dongle, intended for x86 and Raspberry Pi* [online]. 2018 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://github.com/szpajder/RTLSDR-Airband>

- [13] *Great Scott Gadgets* [online]. Evergreen, Colorado USA, 2016 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://greatscottgadgets.com/>
- [14] Gymnázium Sušice. In: *Gymnázium Sušice* [online]. Sušice, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: http://www.gymsusice.cz/predmety/fyzika/studium_f.html
- [15] *KMITOCTY.cz: Original OK1ZOO's radiomonitoring website* [online]. 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://kmitocty.cz/>
- [16] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014. ISBN 978-807-1964-384.
- [17] - *radio-shop.cz* [online]. Osice, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <http://www.radio-shop.cz/>
- [18] *Rasel.cz – specialista na konektory* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://www.rasel.cz/>
- [19] *Rtl-sdr.com* [online]. 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://www.rtl-sdr.com/>
- [20] *Rtl-sdr - rtl-sdr - Open Source Mobile Communications* [online]. 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://osmocom.org/projects/rtl-sdr/wiki/Rtl-sdr>
- [21] *SDR.hu* [online]. [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://sdr.hu/openwebrx>
- [22] *SDRplay* [online]. Hampshire, Velká Británie, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://www.sdrplay.com/>
- [23] Sideband Wikipedia. In: *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sideband#/media/File:Am-sidebands.png>
- [24] *Software defined radio technology for wireless networks. - Lime Microsystems* [online]. Guildford, Velká Británie, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://limemicro.com/>
- [25] *Teroz - Anténní technika Loštice* [online]. Loštice, 2019 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <http://teroz.cz/>
- [26] *The MagPi Magazine - The official Raspberry Pi magazine* *The MagPi Magazine* [online]. 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/magpi/>
- [27] *Websdr.org* [online]. 2008 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <http://www.websdr.org/>
- [28] *1BitSquared - Your source for open source embedded hardware tools.* [online]. Eugene, Oregon USA, 2019 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://1bitsquared.com/>

[29] *RPishop.cz* [online]. České Budějovice, 2019 [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Elektromagnetická vlna (zdroj: převzato z [14]).....	10
Obrázek 2: Rozložení telekomunikačního spektra v letectví (zdroj: převzato z [2]).	14
Obrázek 3: Amplitudová modulace (zdroj: převzato z [4]).	15
Obrázek 4: Frekvenční schéma amplitudové modulace (zdroj: převzato z [23]).	16
Obrázek 5: Zjednodušené blokové schéma realizace radiového přenosu (zdroj: autorův archiv).....	17
Obrázek 6: RTL-SDR dongle (zdroj: autorův archiv).	18
Obrázek 7: Přijímač FUN Cube Dongle Pro+ při propojení s PC a anténou (zdroj: převzato z [11]).	20
Obrázek 8: Vnější pohled na přijímač RSP2 a RSP2 pro (zdroj: převzato z [22]).	21
Obrázek 9: Zařízení Airspy R2 (zdroj: převzato z [3]).	22
Obrázek 10: Airspy mini bez kovového krytu (zdroj: převzato z [3]).	22
Obrázek 11: Vnější pohled na přijímač HackRF One (zdroj: převzato z [13]).	23
Obrázek 12: Rozšíření Portapack na přijímač HackRF One (zdroj: převzato z [28]).	24
Obrázek 13: LimeSDR mini – pohled na vnitřní komponenty (zdroj: převzato z [24]).	24
Obrázek 14: Upravený, běžně dostupný DVB-T tuner na RTL-SDR V3 (zdroj: převzato z [19]).	25
Obrázek 15: Anténa Diamond D-777 - na obrázku anténa vlevo (zdroj: autorův archiv).....	28
Obrázek 16: Discone anténa AOR DA-3200 (zdroj: převzato z [9]).	28
Obrázek 17: Anténa Sirio GP 108-136 LB/UHV – zkrácený náhled (zdroj: převzato z [17])..	29
Obrázek 18: Výsledný návrh systému (zdroj: autorův archiv).....	30
Obrázek 19: Jednočipový mini počítač Raspberry Pi 3 B+ (zdroj: autorův archiv).....	31
Obrázek 20: Programu GQRX instalovaný a ovládaný přímo na Raspberry (zdroj: autorův archiv).....	34
Obrázek 21: Program SDRSharp a Putty (zdroj: autorův archiv).....	35
Obrázek 22: Webové rozhraní programu OpenWebRX (zdroj: autorův archiv).	37
Obrázek 23: Vzdálený přístup za pomoci programu Putty (zdroj: autorův archiv).	41
Obrázek 24: Vypsání údajů Raspberry po zadání testovacího příkazu (zdroj: autorův archiv).	43
Obrázek 25: Nastavení připojení serveru (zdroj: autorův archiv).	44
Obrázek 26: Povolení k zalistování přijímače (zdroj: autorův archiv).....	45
Obrázek 27: Nastavení uživatelského rozhraní (zdroj: autorův archiv).....	45
Obrázek 28: Nastavení frekvence přijímače (zdroj: autorův archiv).....	46
Obrázek 29: Sestava přijímací stanice během testování (zdroj: autorův archiv).....	47
Obrázek 30: Výsledné uživatelské rozhraní přijímací stanice (zdroj: autorův archiv).....	47

Obrázek 31: Lokalita Strahov – umístění antény (zdroj: autorův archiv).....	48
Obrázek 32: Výsledná podoba HW systému při instalaci (zdroj: autorův archiv).	49
Obrázek 33: Výsledná podobna instalace zařízení (zdroj: autorův archiv).	49

Seznam tabulek

Tabulka 1: Spektrum elektromagnetických vln (zdroj: převzato z [16]).....	12
Tabulka 2: Vývoj snižování kanálové separace (zdroj: převzato z [2]).....	13
Tabulka 3: Specifikace přijímačů (zdroj: [3] [11] [13] [19] [22] [24])	26
Tabulka 4: Parametry náročnosti na pořízení a instalaci (zdroj: [3] [8] [11] [13] [19] [22] [24])	27
Tabulka 5: Návrh pokrytí frekvencí na LKPR třemi přijímači typu DVB-T tuner (zdroj: [1]). ..	39
Tabulka 6: Cenové srovnání variant (zdroj: [8] [18] [25] [29]).	40
Tabulka 7: Vhodné frekvence pro nastavení přijímače (zdroj: [28]).	46