

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Mobilní systém pro příjem a dekódování Mode S zpráv

Bc. Jan Pejřil

Diplomová práce

2024

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Pejřil**
Osobní číslo: **I21292**
Studijní program: **N0714A060018 Komunikační a radarové systémy**
Téma práce: **Mobilní systém pro příjem a dekodování Mode S zpráv**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Navrhněte, realizujte systém pro příjem a následné dekodování Mode S zpráv na 1030/1090 MHz, a to s využitím softwarově definovaného rádia (SDR Pluto). Navržený systém bude umět s pořízovat záznam a dekodovat obsah přijatých zpráv. Přijaté a dekodované zprávy bude dále možno filtrovat. Funkčnost navrženého systému bude prakticky ověřena. Součástí práce bude teoretický rozbor Mode S zpráv a výsledky praktického ověření funkčnosti celého systému na reálně zaznamenaných datech.

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

JUNZI, Sun. The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals. 1. Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, 2021. ISBN 978-94-6366-402-8.
FERRARA, John. The ADS-B Guide – eBook. 1. John Ferrara, 2020. ISBN 9780578507262.
ADS-B Reception, Decoding & Sharing with Docker. Online. ADS-B Reception, Decoding & Sharing with Docker. 2023. Dostupné z: <https://sdr-enthusiasts.gitbook.io/ads-b/>. [cit. 2023-09-26].
Automatic Dependent Surveillance-Broadcast. Online. My CFI Book. 2023. Dostupné z: <https://mycfibook.com/book-page/ads-b/>. [cit. 2023-09-26].

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Pidanič, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **8. listopadu 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2024**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. listopadu 2023

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem Mobilní systém pro příjem a dekodování Mode S zpráv jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 27.08.2024

Bc. Jan Pejřil

Poděkování

Rád bych na prvním místě chtěl poděkovat své rodině za podporu, kterou mi poskytují po celou dobu mého studia. Dále bych chtěl věnovat poděkování svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Pidaničovi, Ph. D. za cenné rady, konzultace během vypracování diplomové práce a vypůjčení vybavení. Na závěr bych poděkoval svým kolegům z firmy ERA a.s. za podporu a spolupráci, obzvláště panu Ing. Petru Osinkovi a panu Ing. Viktoru Svobodovi za předané zkušenosti z praxe, trpělivost a především čas, který mi věnovali.

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem mobilního přijímače s využitím softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto a mikropočítače Raspberry Pi 4 pro příjem a dekódování Mode S zpráv. Teoretická část je věnována problematice sekundární radiolokalizace a rozboru používaných módů. V praktické části je popsán použitý hardware a design navrženého zařízení. Část věnována vývoji softwaru popisuje navržený program pro příjem, demodulaci a dekódování Mode S zpráv. V závěru práce jsou popsány jednotlivé metody pro ověření funkčnosti celého systému s jejich vyhodnocením.

Klíčová slova

Přijímač, Mód S, ADS-B, Adalm-Pluto, Raspberry, Python

Title

Mobile system for receiving and decoding Mode S messages

Annotation

The master thesis focuses on the design of a mobile receiver using software defined radio Adalm-Pluto and microcomputer Raspberry Pi 4 for receiving and decoding Mode S messages. The theoretical part is devoted to the issue of secondary radio localization and analysis of the modes used. The practical part describes the selected hardware and design of the projected system. The software development section describes the proposed program for receiving, demodulation and decoding of Mode S messages. At the end of the work, the different methods for verifying the functionality of the whole system with their evaluation are described.

Keywords

Receiver, Mode S, ADS-B, Adalm-Pluto, Raspberry, Python

Obsah

Seznam zkratek.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Přehledové systémy	12
1.2 Princip sekundárního radaru.....	13
1.2.1 Dotazovač a odpovídač.....	14
1.2.2 Výkonová bilance	17
1.3 Používané módy	18
1.4 Módy A/C.....	19
1.4.1 Dotazování A/C	19
1.4.2 Odpovědi A/C.....	20
1.5 Mode S.....	21
1.5.1 Dotazování v módu S	21
1.5.2 Odpovědi módu S	23
1.5.3 Formát datové zprávy dotazů a odpovědí.....	24
1.5.4 All-Call Reply	25
1.5.5 Surveillance Reply.....	25
1.5.6 ACAS	26
1.5.7 Comm-B	27
1.5.8 ELS	28
1.5.9 EHS.....	28
1.5.10 Kontrola parity a CRC.....	29
1.6 ADS-B	29
1.6.1 Formát ADS-B zpráv.....	30
1.6.2 Identifikace letadla	31
1.6.3 Pozice letících cílů.....	32
1.6.4 Pozice pozemních cílů	32
1.6.5 Pozice ve vzduchu	32
1.6.6 Provozní status.....	33

1.7	Softwarově definované rádio.....	33
1.7.1	IQ data	34
2	Použitý hardware.....	36
2.1	Popis systému	36
2.2	Adalm-Pluto	36
2.3	Raspberry Pi 4	37
2.3.1	Konektivita	37
2.3.2	Operační systém	38
2.3.3	Napájení.....	38
2.4	Zdroj napájení – Powerbanka	38
2.4.1	Distribuce napájení	39
2.5	Anténa přijímače.....	39
2.6	Dotykový displej	41
2.6.1	Konfigurace displeje.....	41
2.7	Kryt systému.....	41
3	Vývoj softwaru.....	44
3.1	Spouštění zařízení a programu	44
3.2	Konfigurace SDR a Raspberry Pi 4.....	44
3.3	Použité knihovny a nástroje.....	45
3.4	Popis navrhnutého programu.....	45
3.4.1	Vstupní parametry SDR	46
3.4.2	Předzpracování signálu.....	47
3.4.3	Demodulace zpráv	49
3.4.4	Dekódování odpovědí v módu S	50
3.4.5	Dekódování dotazů v módu S.....	52
3.4.6	Filtrace zpráv	53
3.4.7	Grafické zobrazení výšky letadla	53
3.4.8	Záznam zpráv	55
4	Ověření funkčnosti	57
4.1	Ověření funkčnosti dekodovaných zpráv mód S.....	57
4.1.1	Porovnání s referencí ADS-B Exchange	57
4.1.2	Polohové zprávy z navrženého systému.....	59
4.1.3	Polohové zprávy multilaterančního systému společnosti ERA a.s.....	60

4.2	Výkonnost systému v odlišných podmínkách příjmu signálu	61
4.2.1	Výkonnost systému s anténou ve výšce 217 m AMSL	61
4.2.2	Výkonnost systému s anténou ve výšce 253 m AMSL	63
4.3	Ověření citlivosti systému	64
4.4	Ověření dotazů v módu S	67
4.5	Výdrž napájení navrhnutého systému.....	67
Závěr	69
Literatura	71

Seznam zkratek

A/D	Analog to Digital
ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
AGC	Automatic Gain Control
ALT	Altitude
ASTERIX	All Purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange
ATC	Air Traffic Control
CRC	Cycling Redudancy Check
DF	Downling Format
EHS	Mode S Enhanced Surveillance
ELS	Mode S Elementary Surveillance
ICAO	International Civil Aviation Organization
I/Q	In phase / Quadrature phase
PoE	Power over Ethernet
PSR	Primary Surveillance Radar
PSS	Pasive Surveillance System
RF	Radio Frequency
Rx	Receive / Receiver
SDR	Software Defined Radio
SSR	Secondary Surveillance Radar
Tx	Transmit / Transmitter
UF	Uplink Format
USB	Universal Serial Bus

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Klasifikace přehledových systémů	12
Obrázek 2 - Princip kooperace dvou přehledových systémů	13
Obrázek 3 - Princip dotazování a odpovídání mezi různými módy	14
Obrázek 4 - Blokové schéma obecného transpondéru [5].....	14
Obrázek 5 - Ovládací a sledovací středisko pasivního senzoru VERA-NG [7].....	16
Obrázek 6 - Zobrazení dat z přehledového systému LAPDIS [7].....	16
Obrázek 7 - Struktura dotazu v módu A /C [9]	20
Obrázek 8 - Struktura odpovědi v módu A/C [9].....	20
Obrázek 9 - Blokové schéma moderního radaru využívající módy S a A/C [5].....	21
Obrázek 10 - Mode S: Struktura dotazu [6]	22
Obrázek 11 - Mode S: Přehled struktur pro UF [8].....	23
Obrázek 12 - Mode S: Struktura obecné odpovědi [6].....	23
Obrázek 13 - Mode S: Přehled struktur pro DF [8].....	24
Obrázek 14 - Mode S: Podrobná klasifikace informací [9].....	24
Obrázek 15 - Princip funkce systému ADS-B [1]	29
Obrázek 16 - Příklad unikátní ICAO adresy trackovaného cíle [10]	30
Obrázek 17 - Koncept obecného SDR [11].....	33
Obrázek 18 - Princip IQ dat.....	34
Obrázek 19 - Blokové schéma hardwarové části systému	36
Obrázek 20 - SDR Adalm-Pluto.....	37
Obrázek 21 - Popis konektorů Raspberry Pi 4 B [14].....	37
Obrázek 22 - Powerbanka AlzaPower 20 000 mAh [15].....	38
Obrázek 23 - Anténa VERT900	39
Obrázek 24 - Impedanční přizpůsobení antény – S11 parametry, rozsah 1,5 GHz.....	40
Obrázek 25 - Impedanční přizpůsobení – S11 parametry, rozsah 5 GHz	40
Obrázek 26 - Dotykový displej Waveshare 7" [17].....	41
Obrázek 27 - Rozměry plastového krytu pro HW [18]	42
Obrázek 28 - Kompozice hardwaru uvnitř krytu.....	42
Obrázek 29 - Horní kryt.....	43
Obrázek 30 - Grafické prostředí GNU Radio	46
Obrázek 31 - Blok předzpracování signálu	47
Obrázek 32 - Blok demodulace zpráv	49
Obrázek 33 - Blok dekódování odpovědi v módu S.....	50
Obrázek 34 - Zaznamenaný cíl 4D2384	54
Obrázek 35 - Cíl 4D2384 z referenčního zdroje	55
Obrázek 36 - Barometrická výška 4D2384	55
Obrázek 37 - Ukázka uloženého záznamu v textovém souboru.....	56
Obrázek 38 - Polohové zprávy na mapovém podkladu.....	57
Obrázek 39 - Zaznamenaný cíl 4BCE12	58
Obrázek 40 - Porovnání cíle 4BCE12 s referenčním zdrojem	58
Obrázek 41 - Ukázka přijaté zprávy v módu S.....	59

Obrázek 42 - Měřicí pracoviště: Pardubické letiště.....	59
Obrázek 43 - Polohová data cíle 4984A5	60
Obrázek 44 - Porovnání polohových dat cíle 4984A5 se systémem ERA	61
Obrázek 45 - Záznam dat s anténou ve výšce 217 m AMSL (cíl 3C6749).....	62
Obrázek 46 - Výkonnost systému s anténou ve výšce 217 m AMSL (cíl 3C6749).....	62
Obrázek 47 - Záznam dat s anténou ve výšce 253 m AMSL (cíl 4CA242).....	63
Obrázek 48 - Výkonnost systému s anténou ve výšce 253 m AMSL (cíl 4CA242).....	64
Obrázek 49 - Blokové schéma měřicího pracoviště pro ověření citlivosti systému.....	65
Obrázek 50 - Signálový generátor SIGLENT	66
Obrázek 51 - Ukázky dekódovatelné úrovně přijaté zprávy	66
Obrázek 52 - Práh dekódovatelnosti přijaté zprávy.....	67
Obrázek 53 - Záznam simulace dotazů All-Call (UF 11).....	67

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Seznam používaných módů v přehledových systémech [6]	18
Tabulka 2 - Přehled vzdáleností pulzů P1 – P3 dotazů pro různé módy [6]	19
Tabulka 3 - Struktura DF 11, všeobecné odpovědi pro mód S [8].....	25
Tabulka 4 - Struktura Surveillance Reply [8].....	26
Tabulka 5 - Barometrická výška Surveillance Reply [9]	26
Tabulka 6 - Klasifikace informací obsahující blok MB pro mód S [8].....	27
Tabulka 7 - Obecná struktura ADS-B zprávy [9].....	30
Tabulka 8 - Klasifikace informací obsahující blok ME pro ADS-B [9]	31
Tabulka 9 - Rámec ADS-B – Identifikace letadla [8]	31
Tabulka 10 - Rámec ADS-B – Pozice ve vzduchu [8].....	32
Tabulka 11 - Rámec ADS-B – Pozice na zemi [8].....	32
Tabulka 12 - Konfigurace SDR	47
Tabulka 13 - Energetická náročnost systému	68

Úvod

S rozvojem a rozšiřováním civilní dopravy roste hustota provozu letadel a ostatních prostředků ve vzdušném provozu, což má za následek potřebu navýšení kapacity pro kontrolu a řízení letového prostoru. V praxi je možné řídit letový provoz několika systémy využívající odlišné metodiky. Mezi často využívané systémy patří primární radary, jež pracují na základě detekce odrazů vyslaných signálů od sledovaného objektu. Dále jsou to sekundární radary, které naopak aktivně vysílají dotazy a následně přijímají odpovědi od cílů. V současné době se v této oblasti stává více populární systém ADS-B, který pracuje na principu automatického periodického vysílání informací o cíli bez nutnosti dotázání sekundárním radarem. V současné době je již na většině území po celém světě povinné využívat v letecké technologii ADS-B. Princip ADS-B umožňuje i běžným uživatelům konstrukci vlastních přijímacích stanic pro sledování letového provozu. Tímto způsobem fungují webové stránky, jako například FlightRadar24 nebo ADS-B Exchange, sdílející veřejně data od uživatelů. S ohledem na dynamiku leteckého provozu a zájem sledovat vzdušný prostor i v oblastech s nedostatečným pokrytím je klíčovým úkolem diplomové práce návrh mobilního systému schopného přijímat a zpracovávat Mode S zprávy (Včetně ADS-B) na frekvencích 1030 MHz a 1090 MHz s využitím softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto. Cílem této práce je poskytnout efektivní a levné řešení pro monitorování vzdušného prostoru, aby systém fungoval jako nezávislý zdroj dat.

Teoretická část diplomové práce zahrnuje popis principu sekundárních radarů z hlediska využití a technické realizace včetně dotazovačů a odpovídačů. Následuje úvod do používaných signálů neboli módů z hlediska struktury a využití v přehledových systémech. Detailnější část teoretické části je poté věnována způsobu dotazování a odpovídání pro běžně používané módy A/C a S.

Kapitola použitý hardware popisuje parametry vybraných komponentů, který byly použity pro návrh fyzické vrstvy diplomové části. Jednotlivé kapitoly se zabývají softwarově definované rádio Adalm-Pluto, řídicí jednotku Raspberry Pi 4, způsob napájení pro navrhnutý mobilní systém, použitou anténu VERT900 včetně jejich parametrů a kryt.

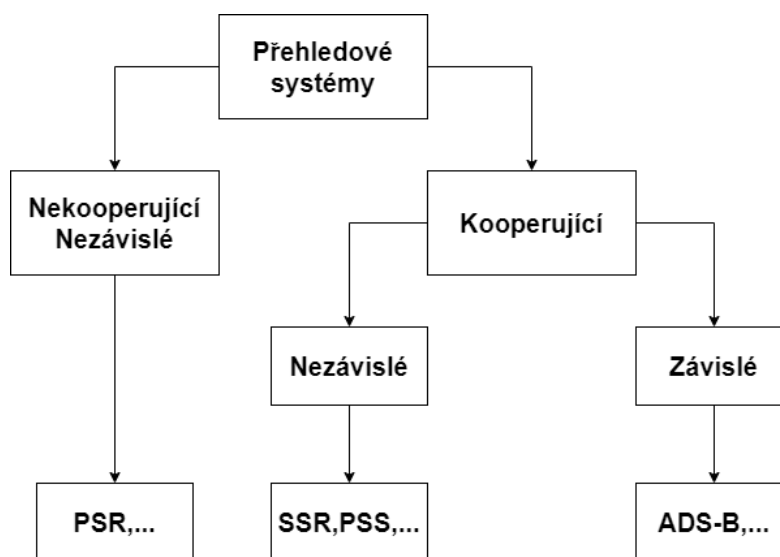
Praktická část diplomové práce je poté popsána v kapitole vývoj softwaru, která rozděluje program jako celek do několika dílčích logických částí, které zastřešují jednotlivé soubory algoritmů pro samotnou konfiguraci SDR, příjem signálu, demodulaci, dekódování, prezentaci zpráv. Součástí popisu jsou i přídatné funkce pro filtraci zpráv, zobrazení grafu letové hladiny filtrovaného cíle a automatický záznam dat.

Poslední kapitola diplomové práce je zaměřena na samotné ověření navrhnutého systému s ohledem na zadání práce. Ověření zahrnuje porovnání dekódovaných dat vůči referenci společně se stanovením dosahu systému a zhodnocení výdrže napájení.

1 Teoretická část

1.1 Přehledové systémy

Přehledový systém v radarové technice představuje komplexní zařízení umožňující sledování objektů v definované oblasti. Primárním cílem většin systémů je především lokalizace cíle, sledování jeho pohybu a identifikace. Tato technologie poté nachází uplatnění v různorodých odvětvích, převážně v letecké dopravě a dalších jako jsou námořní doprava, armáda, meteorologie a další. Na obrázku níže je klasifikace těchto systémů podle svých vlastností. [1]



Obrázek 1 - Klasifikace přehledových systémů

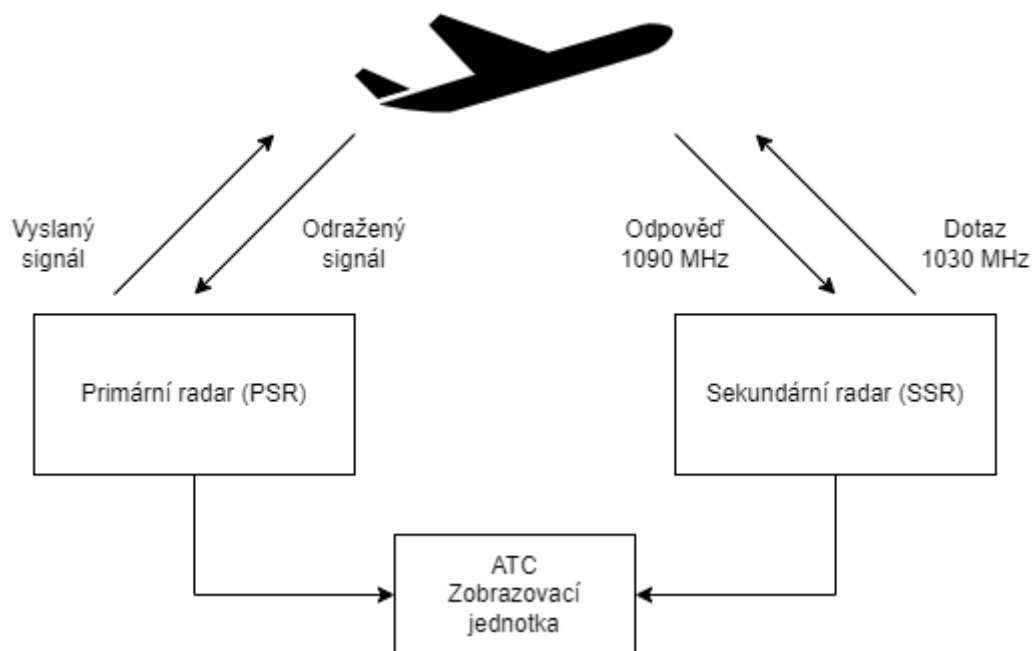
Nekooperativní systémy nepoužívají ke své funkci z hlediska získávání informací žádné jiné systémy, například Sekundární přehledové systémy SSR. Typickým příkladem jsou primární radary, které využívají odražených elektromagnetických vln od cílů a s pomocí získaných informací dokážou stanovit polohu objektu. [1]

Kooperativní systémy vyžadují k své správné funkci kooperaci se sledovanými objekty. V případě letectví se jedná o systém na palubě letadla, který dokáže zpracovávat přijatý signál (dotazy) a vysílat signál (odpovědi) zpět k přehledovému systému.[1]

Závislé a **nezávislé** systémy se odlišují ve způsobu získávání informací o poloze letadla, přičemž systémy, které jsou závislé využívají pro určení polohy systémů na palubě letadla jako například GNSS. Příklad závislého přehledového systému je technologie ADS, a především velmi rozšířené ADS-B. Nezávislé systémy naopak určují polohu letadla s pomocí technologie pozemních stanic v souvislosti s přijatým signálem (odpovědi) od cílů. Mezi takové systémy lze zařadit SSR a pasivní přehledové systémy (PSS). [1]

1.2 Princip sekundárního radaru

Sekundární radar je zařízení, jehož princip spočívá ve vysílání dotazovacího signálu na frekvenci 1030 MHz a zpracování odpovědi vyslané od cílů na druhé pevné frekvenci 1090 MHz. Tyto systémy se převážně používají pro řízení letového provozu (ATC). Úkolem systémů je lokalizace a identifikace cílů na základě analýzy přijatých signálů. Primární radary dokážou lokalizovat cíl na základě okamžitého úhlu radaru a příjmu odraženého signálu od cíle. Některý typy PSR jako je například ReGuard od Pardubické firmy RETIA, a.s. dokážou klasifikovat typ cíle [2]. Sekundární radary poskytují významnou výhodu v množství a typech informací, které o cíli dokážou zpracovat, nicméně tato technologie je závislá na kooperaci s letadly, drony, dotazovači a dalšími zařízeními. Často se lze v praxi setkat se spoluprací primárního a sekundárního radaru kombinující výhody obou systémů, jejichž data se doplňují. [3]

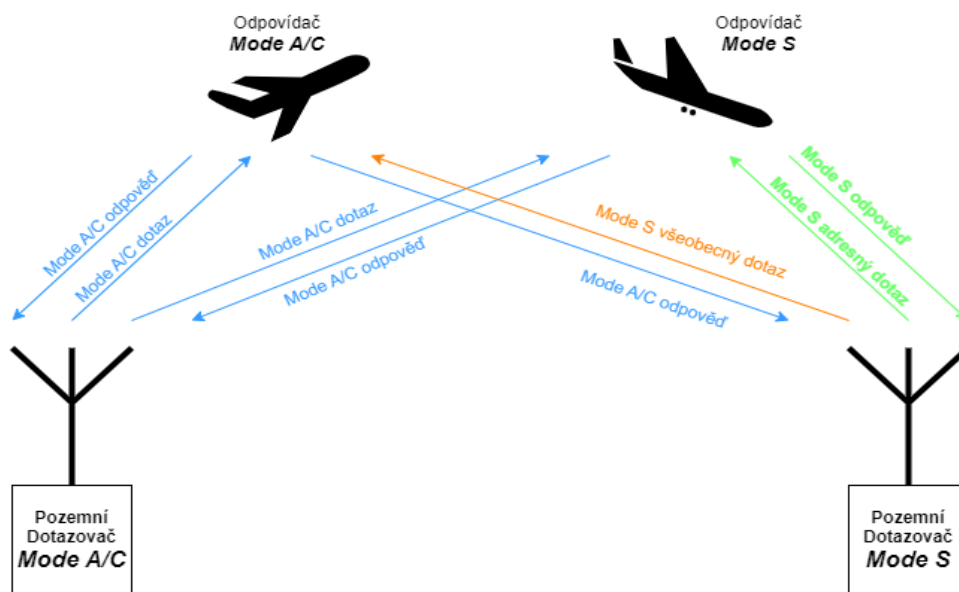


Obrázek 2 - Princip kooperace dvou přehledových systémů

Na obrázku výše je popsán princip kooperace dvou systémů využívající různých principů pro sběr informací o cíli a jejich následné sloučení na úrovni zobrazovací jednotky. Sekundární radar potřebuje pro svou činnost dotazovač, který vysílá dotazy na zmiňované frekvenci 1030 MHz a transpondéry na palubách letadel, které reagují na dotazy či samovolně vysílá nevyžádané odpovědi (DF17/18/19) obsahující požadované údaje na frekvenci 1090 MHz.

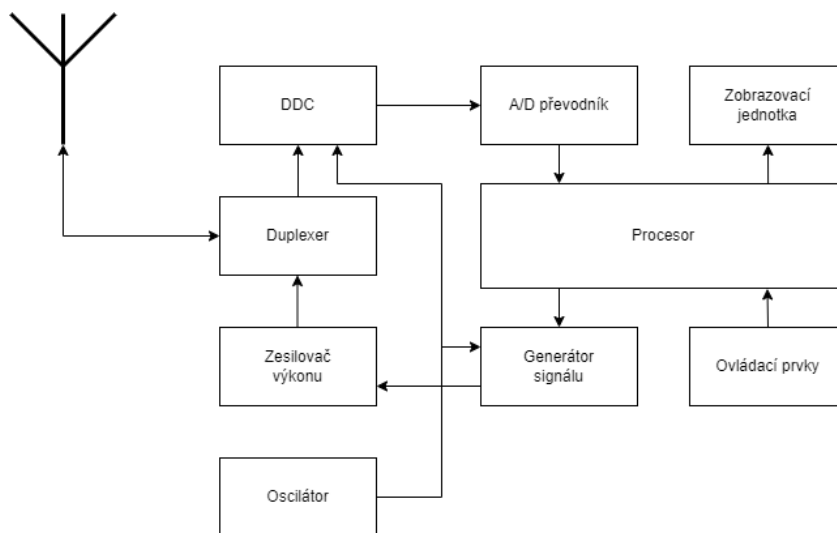
1.2.1 Dotazovač a odpovídač

Dotazovač je zařízení, které vysílá signál (dotaz) na frekvenci 1030 MHz, a odpovídač je zařízení, které přijímá signál (dotaz) na frekvenci 1030 MHz a následně vysílá odpověď na frekvenci 1090 MHz. Na obrázku níže jsou znázorněny způsoby, kterými dochází ke komunikaci mezi pozemními stanicemi a cíli ve sledovaném prostoru. Signály, které jsou vysílány prostřednictvím této technologie, mají pevně definovanou strukturu, která je popsána v kapitolách 1.5 Módy A/C, 1.5 Mód S a 1.6 ADS-B.



Obrázek 3 - Princip dotazování a odpovídání mezi různými módy

Moderní pozemní vysílače a přijímače využívají pro podporu zpracování módů A/C/S společný hardware. Příkladem takového systému je například sekundární monopolní přehledový radar MSSR-1 vyvinut společností ELDIS. Tento systém využívá pohyblivou tříkanálovou anténu obsahující 35 sloupců zářičů s dosahem 256 NM v konfiguraci vysílač/přijímač. [4]



Obrázek 4 - Blokové schéma obecného transpondéru [5]

Z obrázku č. 4 vyplývá princip, na kterém obecný transpondér (odpovídač) pracuje. V praxi je využíváno široké škály antén kvůli jejich specifickým vlastnostem. Například malá letadla mají speciální typ antény umístěný na spodku samotného letadla z důvodu šíření signálu v prostoru. Naopak velká dopravní letadla mají anténu dole i nahoře kvůli diverznímu příjmu signálů. Za anténou, tedy za vstupem transpondéru se nachází duplexer, který slouží k oddělení jednoho vstupu/výstupu k příjmu a vysílání signálu. Celé blokové schéma lze rozdělit na rozhraní duplexeru na dva řetězce – přijímací a vysílací. [6]

Přijímací řetězec zpracovává přijatý signál (UF) a v bloku DDC (Digital Down Converter) dochází k převzorkování digitálního signálu na jinou frekvenci pro potřeby dalšího zpracování. Za tímto blokem následuje A/D převodník, který transformuje analogový signál na digitální, který je poté vstupem procesoru zajišťující samotné dekódování signálu na jednotlivé informační bloky. Dekódovaná zpráva je poté distribuována na zobrazovací jednotku a případně bloku zajišťující záznam těchto dat. [5]

Vysílací řetězec začíná procesorem, který na základě ovládacích prvků bere vstup od uživatele (či paměti) a kóduje informace do příslušné struktury signálu. Za blokem procesoru tedy dochází ke generování samotného řetězce signálu na příslušné vysílací frekvenci (za pomoci lokálního oscilátoru a směšovače), který je následně zesílen na požadovaný vysílací výkon. Tento řetězec signálu přichází na vstup duplexeru, který odděluje oba tyto řetězce, a signál (DF) putuje na anténu, kde je vysílán do prostoru ve formě elektromagnetické vlny. [5]

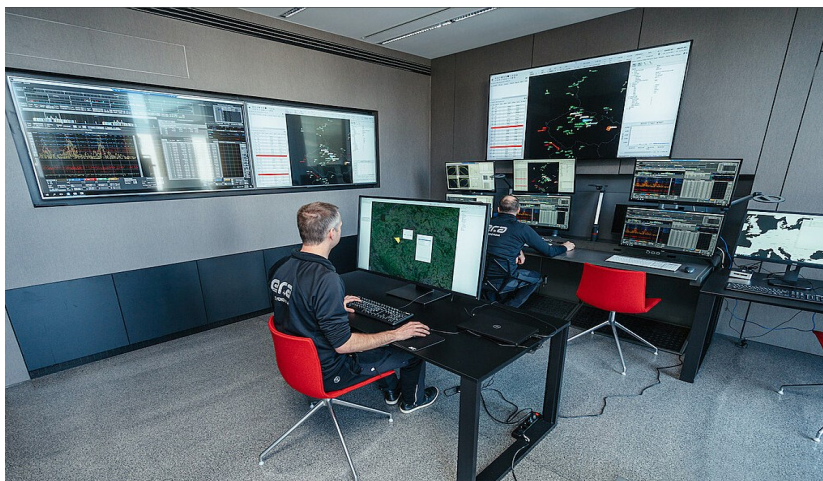
1.2.1.1 Generátor signálu

V případě vysílacího řetězce pro UF dotazy zastává generátor signálu funkci zakódování informací do požadované struktury dle módu dotazování. Generátor signálů je úzce spjatý s procesorem a konfigurací systému, přičemž generované dotazy bývají ukládány do paměti společně s přijatými odpověďmi. Systém může systematicky generovat dotazy dle konfigurace, nicméně v praxi se lze setkat i se systémy, které dokážou dynamicky měnit frekvenci a strukturu dotazů dle potřeby. [5]

Obdobně pracuje generátor signálu v případě vysílací frekvence DF odpovědí. Informace, které jsou zakódovány v signálu, obsahují data ze senzorů, automaticky či ručně nastavené parametry od dotázaného (nebo ADS-B) cíle.

1.2.1.2 Ovládací prvky

Pod ovládacími prvky se skrývají všechny konfigurovatelné komponenty, které mohou být laděny uživateli systému. V případě pozemní stanice se může například jednat o konfiguraci, kterou si řídicí letového provozu mění dle situace a může například měnit sledovaný sektor ze kterého sbírá data, může sledovat status systému a reagovat na poruchy nebo například filtrovat tok dat a sledovat pouze určité cíle. Naopak piloti letadla mohou například měnit identifikační označení letadla na transpondérech.

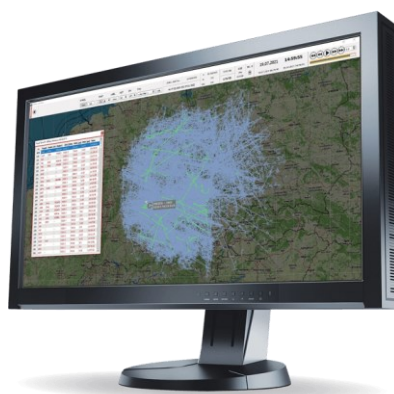


Obrázek 5 - Ovládací a sledovací středisko pasivního senzoru VERA-NG [7]

Na obrázku č. 5 je ukázka vzdáleného pracoviště pro sledování a kontrolu vojenského pasivního systému VERA-NG od Pardubické firmy ERA. Systém je navržen tak, aby operátor mohl sledovat a analyzovat přijaté signály a mohl konfigurovat systém dle jeho potřeb, například z hlediska laděné frekvence, parametrů radarových signálů, ukládání informací o cílech do databáze a mnoho dalších činností.

1.2.1.3 Prezentace dat

Jedním z nejdůležitějších aspektů přehledových systémů je prezentace dat. Přijaté a dekodované zprávy bývají v praxi kódovány do speciálních datových formátů, jako je například ASTERIX.



Obrázek 6 - Zobrazení dat z přehledového systému LAPDIS [7]

Na obrázku č. 6 je příklad softwaru LAPDIS vyvinut dceřinou společností R-SYS společností ERA pro zobrazování dat ve formátu ASTERIX z živého provozu. Nástroj umožňuje grafické zobrazení zavedených tracků na mapovém podkladu s detailním popisem vlastností získaných od daného cíle. [7]

1.2.2 Výkonová bilance

Výhodou sekundárních radarů v porovnání s primárními radary je lepší výkonová bilance z hlediska dosahu. Dosah v závislosti na přijímaném výkonu signálu je oproti PSR delší, jelikož odpovídač na palubě letadla generuje signál (odpověď) a následně vysílá odpověď, která je zachycena dotazovačem. V případě PSR nedochází k zesílení signálů v místě odrazu, naopak je signál postupně zeslabován vlivem ztrát šířením elektromagnetické vlny. Dosah dotazovače (UF) je spojen mimo jiné s citlivostí přijímače transpondérů MTL a jeho zjednodušený zápis je dán rovnicí (1.1). [3],[8]

$$P_{P_{odp}} = \frac{P_{V_{dot}} \cdot G_{dot}}{4\pi \cdot R_{max}^2 \cdot L} \cdot \frac{G_{odp} \lambda_{dot}^2}{4\pi} \geq MTL, \quad (1.1)$$

kde $P_{P_{odp}}$ – Výkon dotazu přijímaný odpovídačem (UF),

$P_{V_{dot}}$ – Výkon vysílací části pozemní stanice (UF),

G_{dot} – Zisk antény pozemní stanice,

G_{odp} – Zisk antény odpovídače,

λ_{dot} – Vlnová délka vyslaného signálu dotazovače,

R_{max} – Dosah systému,

L – Přídavné ztráty,

Z rovnice (1.1) plyne, že úroveň přijatého výkonu odpovídačem musí alespoň dosahovat hodnot spouštěcí úrovně přijímače MTL, aby byl dotaz zachycen. Přídavné ztráty ve vztahu výše sdružují konkrétní typy ztrát, které negativně ovlivňují potřebný přijímaný výkon. Typů ztrát existuje v praxi několik, jako příklad lze uvést polarizační ztráty způsobené vzájemnou polohou antén, čočkové ztráty způsobené ohybem elektromagnetických vln okolo zakřivení povrchu Země nebo ztráty způsobené průchodem signálu atmosférou. Obdobně jako v případě dotazovače musí úroveň přijímaného signálu dotazovačem splňovat podmínku pro správné přijetí signálu v souvislosti s minimální detekovatelnou úrovní MDL. [8]

$$P_{P_{dot}} = \frac{P_{V_{odp}} \cdot G_{odp}}{4\pi \cdot R_{max}^2 \cdot L_{all}} \cdot \frac{G_{dot} \lambda_{odp}^2}{4\pi} \geq MDL, \quad (1.2)$$

kde $P_{P_{dot}}$ – Výkon odpovědi přijímaný pozemní stanicí (DF),

$P_{V_{odp}}$ – Výkon vysílaný odpovídačem (DF),

λ_{odp} – Vlnová délka vyslaného signálu odpovídače,

Úroveň citlivosti MTL pro mód S je normou stanovena hodnotou $-74 \text{ dBm} \pm 3 \text{ dB}$ a pro SIF $-73 \text{ dBm} \pm 4 \text{ dB}$. [8]

System je navržen a normou vázán tak, aby přijímací část pozemní stanice byla citlivější nežli přijímací část odpovídače o 3 až 6 dB. Tímto způsobem se předchází zahlcení komunikačního kanálu (= zvýšení kapacity kanálu) tím, že by jeden dotaz vyvolal odpověď u velkého množství cílů – i příliš vzdálených.[8]

1.3 Používané módy

Struktura signálů využívaná sekundárními přehledovými systémy je pevně svázána s normami, které předepisují mezinárodní organizace. Jedním příkladem je norma ICAO Annex 10. V letectví existují dva druhy standardizovaných komunikačních protokolů pro civilní a vojenské odvětví. Civilní Mód A se využívá pro identifikaci letadla pomocí unikátního 4-místného identifikačního kódu a mód C obsahuje informace o barometrické výšce. Mód S umožňuje identifikovat dotazovaný cíl a dokáže přenášet informace, například meteorologické informace. Výhodou takového systému (v porovnání s PSR) je detailnější poskytování informací pro přehledový systém, nicméně využívání této technologie s sebou nese i řadu nevýhod. Jednou z největších nevýhod je například omezený počet kanálů v oblastech s hustějším letovým provozem, což může vést k problémům se ztrátou nebo chybnou interpretací z důvodu tzv. garblingu a klesající četností detekce. [8]

Tabulka 1 - Seznam používaných módů v přehledových systémech [6]

Mód	
Vojenský	Civilní
1	
2	
3	A
	C
4	
5	
S	

V tabulce výše jsou zmíněny historicky i současně využívané módy, které představují soubor pravidel a strukturu, jakou bude signál reprezentován a přenášen. Historicky byly vyvinuty 4 civilní a 3 vojenské módy. V současnosti jsou využívány civilní módy A, C a S. Existovaly i módy B a D, které se ovšem nikdy nepoužívaly, jelikož docházelo k záměnám s jinými módy. Vojenský mód 3 je shodný s civilním módem A, proto se lze v praxi setkat

s označením 3/A. Vojenské systémy nesou název IFF (mód 4 a 5), tedy rozpoznání vlastní/cizí. Vojenské módy 1 a 2 jsou používány pro identifikaci a lokalizaci. [8]

1.4 Módy A/C

Jedním z nejstarších a stále využívaných módů pro civilní použití jsou módy A a C, které často bývají sjednoceny pod názvem A/C nebo SIF. Z historického hlediska s nárůstem hustoty letového provozu a požadavků na spolehlivost a bezpečnost jsou tyto módy nahrazovány novějším módem S, nicméně stále se s nimi v běžném provozu lze setkat. [9]

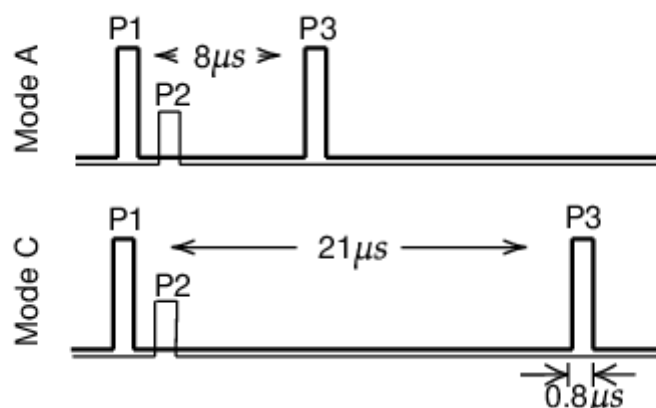
1.4.1 Dotazování A/C

Dotazy mohou být vysílány s různými průběhy neboli módy, a odpovídače na ně reagují vysíláním stejným formátem kódu. Soubor minimálních požadavků pro přehledové systémy ICAO Annex 10 Volume IV. [8] popisuje strukturu dotazu UF pro mód A/C třemi pulzy P1, P2 a P3, přičemž jednotlivé módy se odlišují rozestupem mezi pulzy P1 a P3. V tabulce č. 2 jsou uvedeny příklady vzdáleností mezi jednotlivými vojenskými a civilními módy

Tabulka 2 - Přehled vzdáleností pulzů P1 – P3 dotazů pro různé módy [6]

Vojenský	Civilní	Rozestup P1 – P3 [μ s]	Poznámka
1		3 ($\pm 0,2$)	
2		5 ($\pm 0,2$)	
3	A	8 ($\pm 0,2$)	Sjednocené označení
	B	17 ($\pm 0,2$)	Ukončena podpora
	C	21 ($\pm 0,2$)	
	D	25 ($\pm 0,2$)	Ukončena podpora

Šířky všech pulzů jsou stejné, tedy 0,8 ($\pm 0,1$ μ s) mikrosekund. Vzdálenost mezi pulzy P1 a P2 by měla dosahovat 2 ($\pm 0,15$) mikrosekund. Na obrázku č. 7 je zobrazen průběh dotazu v módu A/C.



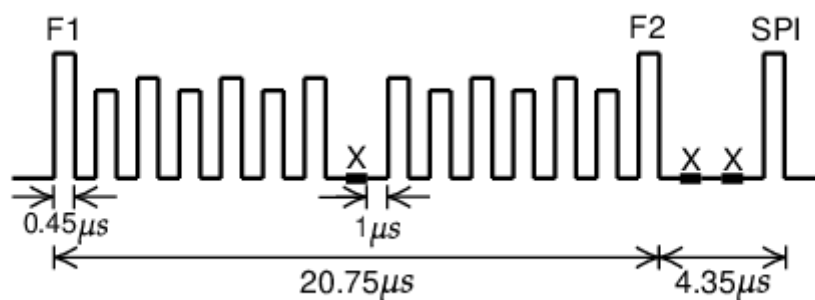
Obrázek 7 - Struktura dotazu v módu A /C [9]

Pulz P2 se využívá pro omezení vysílání odpovědi odpovídači v případě, kdy přijmou dotaz vyslaný bočním lalokem antény radaru. Pokud amplituda P2 bude stejná či vyšší jak amplituda pulzů P1 a P3 musí nastat potlačení odpovídače po dobu 35 μs (+10 μs). [3]

Forma odpovědi dotazovaného cíle závisí na schopnosti odpovídače, zda dokáže reagovat na přijatý dotaz, přičemž v takovém případě mohou dotazovače kombinovat vysílané módy, aby dokázaly pokrýt a dotázat všechny cíle ve sledované oblasti. Maximální počet dotazů, které může dotazovač vyslat během jedné sekundy, je 450 dotazů, aby se omezila vysoká hustota dotazů v prostoru a nedocházelo k vzájemnému rušení a zahlcení odpovídačů.

1.4.2 Odpovědi A/C

Dominantní složku odpovědi módu A/C představují dva takzvané „Framing“ pulzy, které ohraničují samotnou zakódovanou odpověď. Pevný rozestup mezi těmito pulzy je 20,3 μs , přičemž díky tomuto pravidlu lze snadněji identifikovat druh signálu. V této periodě se nachází 13 pulzů pro mód A, nebo 11 pulzů pro mód C o šířce 0,45 μs , které mezi sebou mají rozestup 1 μs . Prostřední pulz se v signálu vynechává a používá se pro ověření. Tyto pulzy nesou informaci o identifikaci nebo o barometrické výšce. V obrázku č. 8 je též zobrazen pulz SPI, který se používá pro identifikaci na vyžádání řídicích letového povozu. [9]



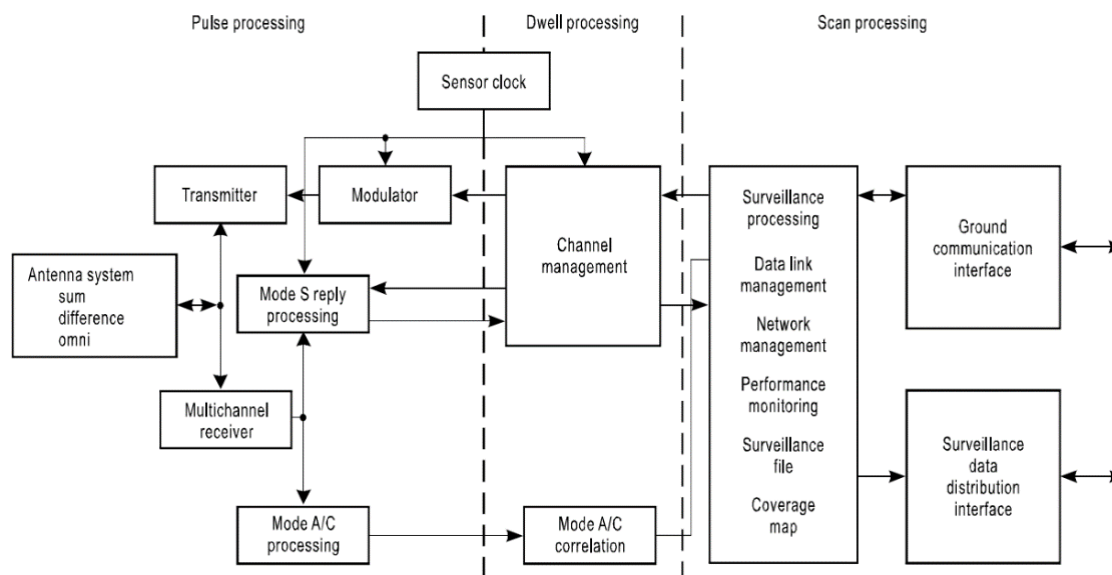
Obrázek 8 - Struktura odpovědi v módu A/C [9]

Mód 3/A je využíván pro přenos informace o číslu letu ve formě 4 oktálových číslic, přičemž počet dostupných adres je omezen na 4096 (8^4) unikátních kódů. Existují některé kombinace, tedy kódy, které nelze považovat za číslo letu, jelikož mají jiný význam, jako například ztráta spojení (7600), únos letadla (7500), nouze (7700) a kombinace využívaná pro testování cíle (7777). [9]

Mód 3/C je využíván pro přenos informace o barometrické výšce letadla. Obdobně jako u módu 3/A je k dispozici pouze omezený počet unikátních kódů, proto je výška kvantována s krokem 100 stop v rozmezí -1000 až 126 750 stop. [9]

1.5 Mode S

Postupem času s rostoucí hustotou letového provozu vzrůstaly i požadavky na jeho jednoznačnou kontrolu a především bezpečnost. Dosavadní mód A nabízel pouhých 4096 unikátních adres, což bylo nedostačujících. Písmeno "S" v označení znamená "Selective". Cíle s vybavením pro mód S mají přiřazen jednoznačný kód (24 bitovou mód S adresu), díky níž mohou být jednoznačně dotazovány a jejich odpovědi jsou k nim jednoznačně přiřazeny. Obdobně jako módy A/C využívá mód S princip dotazování na frekvenci 1030 MHz a příjem odpovědí na frekvenci 1090 MHz, přičemž principem se do této technologie řadí i ADS-B, které nevyžaduje, aby cíl byl dotazován. Na obrázku číslo 9 je popsáno blokové schéma moderního sekundárního radaru využívající tři zmíněné civilní módy. [8], [9]

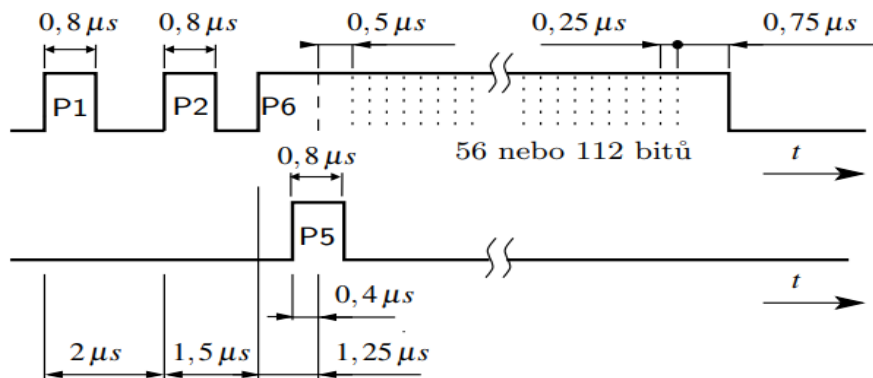


Obrázek 9 - Blokové schéma moderního radaru využívající módy S a A/C [5]

1.5.1 Dotazování v módu S

Mód S cíle jsou v případě sekundárního radaru dotazovány všeobecným (neadresným) dotazem. Jakmile dotazovač (pozemní stanice) získá zpět odpověď na tento dotaz obsahující 24bitovou adresu cíle, přechází dotazovač na adresné dotazování pro tento konkrétní cíl. Pomocí odlišných formátů dotazů může dotazovač získat různé typy informací.[1]

Adresný dotaz je navržen tak, aby na něj starší odpovídače nereagovaly, jelikož je koncipován tak, aby na něj dokázaly odpovědět pouze odpovídače vybaveny schopností vysílat mód S odpovědi. Na obrázku č. 10 je zobrazena struktura dotazu. K dotazování konkrétního cíle s unikátní adresou je zapotřebí znát danou adresu, která může být získána pomocí druhého způsobu dotazování, tedy všeobecného dotazu, nebo zachycením samovolně vysílaného signálu tzv. „squitter“. [3]



Obrázek 10 - Mode S: Struktura dotazu [6]

Dvojice prvních pulzů P1 a P2 s šířkami $0,8 \mu s$ a rozestupem $2 \mu s$ je označována názvem „preamble“ a využívá se k identifikaci rámce. V případě, kdy je signál přijat A/C transpondérem začne systém dekódovat „preamble“ a vyhodnotí, že amplituda pulzu P2 je stejná jako amplituda pulzu P1 a zařízení tedy vyhodnotí signál jako signál SLS, na který nesmí odpovídat. [3]

Šířka bloku dat začínající pulzem P6 obsahující data je dlouhá $16,25$ nebo $30,25 \mu s$ (dle počtu datových bitů 56 nebo 112), přičemž pro synchronizaci je využívána referenční fázová změna ve vzdálenosti $1,25 \mu s$ od náběžné hrany P6. Uvnitř pulzu je použita DPSK modulace, kdy je logická jednička reprezentována změnou fáze o 180 stupňů a logická nula poté vynecháním fázové změny. [3]

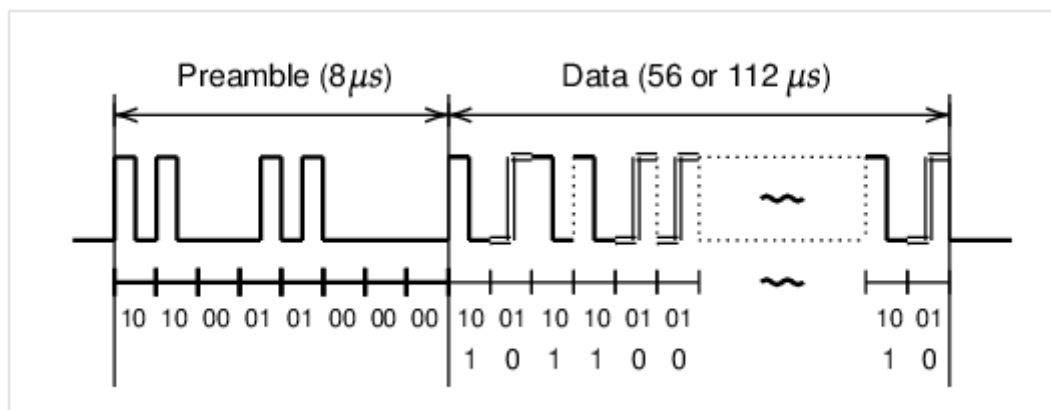
Všeobecný dotaz je využíván pro vyvolání odpovědi od všech mód S cílů pro získání přehledu o sledovaném prostoru. Existují dvě varianty všeobecného dotazu, lišící se v délce pulzu P4. Dlouhá varianta pulzu ($P4 = 1,6 \mu s$) vyvolá odpovědi v Módu S, které vyšlou svou adresu. Druhá varianta ($P4 = 0,8 \mu s$) nevyvolá u mód S cílů žádnou odpověď, ale vyvolá odpověď odpovídačů A/C. [3]

UF	Short [56 bits]																																Extended [+56 bits]	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33-56	1-32
0	UF		FILLER		RL	FILLER		AQ	DS				FILLER								AP													
4	UF		PC		RR		DI		SD								AP																	
5	UF		PC		RR		DI		SD								AP																	
11	UF		PR		IC		CL		FILLER								AP																	
16																																		
17																																		
18																																		
20	UF		PC		RR		DI		SD								MA	AP																
21	UF		PC		RR		DI		SD								MA	AP																
24	UF	RC	NC		MC								AP																					

Obrázek 11 - Mode S: Přehled struktur pro UF [8]

1.5.2 Odpovědi módu S

Struktura odpovědi módu S je tvořena dvěma částmi, přičemž první z nich, která se využívá pro identifikaci je dlouhá 8 μ s a nazývá se „preamble“ (hlavička). Druhá část obsahující samotná data je dlouhá 56 nebo 112 μ s. Data jsou modulována pomocí pulzní polohové modulace PPM, kdy se informace přenáší posloupností pulsů různé délky. Na obrázku. 12 je vyobrazena struktura odpovědi v módu S se zvýrazněným „preamble“ a datovou částí.



Obrázek 12 - Mode S: Struktura obecné odpovědi [6]

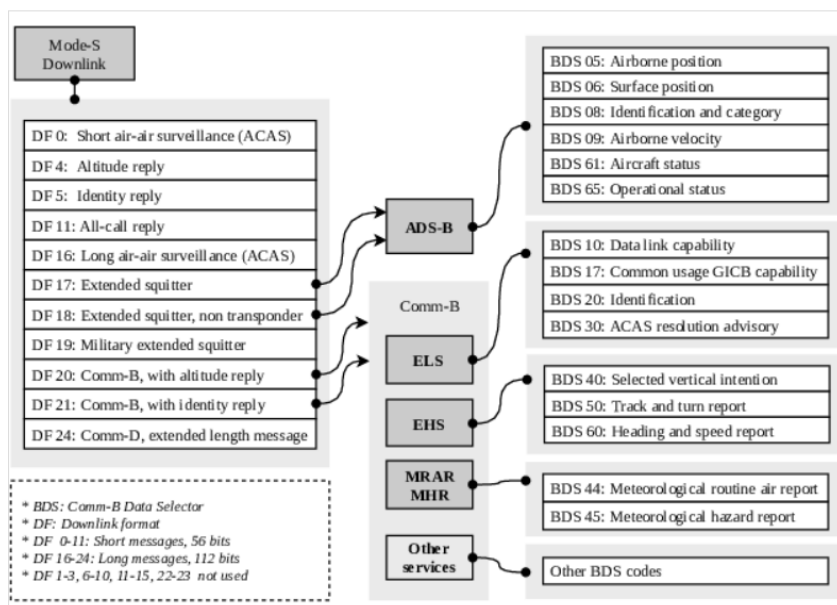
Obrázek č. 12 znázorňuje struktury jednotlivých typů odpovědí (DF) v módu S, včetně šedě vyznačených struktur technologie ADS-B. Detailní popis vybraných odpovědí bude popsán v následujících kapitolách.

DF	[Short 56 bits]																																Extended [+56 bits]	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33-56	1-32
0	DF				VS	CC	S	SL			S	RI			S	AC											AP							
4	DF				FS			DR			UM			AC											AP									
5	DF				FS			DR			UM			ID											AP									
11	DF				CA			AA											PI															
16	DF				VS	S	SL			S	RI			S	AC											MV	AP							
17	DF				CA			AA											ME	PI														
18	DF				CF			AA											ME	PI														
20	DF				FS			DR			UM			AC											MB	AP								
21	DF				FS			DR			UM			ID											MB	AP								
24	DF	S	KE	ND			MD												AP															

Obrázek 13 - Mode S: Přehled struktur pro DF [8]

1.5.3 Formát datové zprávy dotazů a odpovědí

Formát S módových zpráv je navržen tak, aby dokázal pracovat s různými variantami dotazů a odpovědí. Prvních 5 bitů definují druh dotazu (UF) nebo odpovědi (DF), které se rozlišují odlišnou strukturou i délkou. Poté následují samotná data, které nesou informace například o barometrické výšce letadla, geografickou polohu a jiné. V poslední řadě obsahují zprávy pole pro paritní či kombinovanou paritní a adresní informaci. V tabulce níže jsou obsaženy používané formáty UF a DF zpráv. Z obrázku č.11 vyplývá, že dotazy UF 17 a 18 se nepoužívají, jelikož odpovědi DF 17 a 18 vysílají zprávy bez podmínky, že cíl musí být dotazován (viz. kapitola 1.6 ADS-B). [9]



Obrázek 14 - Mode S: Podrobná klasifikace informací [9]

Na obrázku č. 14 je zobrazen přehled typů informací, které lze přenášet pomocí technologie mód S rozdělené do jednotlivých kategoriích, na které se vztahují jiné způsoby kódování a dekodování, které budou popsány v následujících kapitolách.

1.5.4 All-Call Reply

All-Call reply neboli odpověď na všeobecný dotaz je nadefinován jako DF 11, což je odpověď od cíle, který byl dotázán všeobecným dotazem UF 11. Délka datové zprávy je 56 bitů viz. Tabulka č. 3

Tabulka 3 - Struktura DF 11, všeobecné odpovědi pro mód S [8]

Downlink Format	Capability	Address Announced	Parity/Interrogator identifier
DF (5)	CA (3)	AA (24)	PI (24)

DF je standardně přítomen ve všech typech odpovědí z důvodu jednoznačné identifikace obecného typu zprávy. V případě odpovědi na všeobecný dotaz může DF nabývat pouze hodnoty „01011“.

CA reprezentuje třídu transpondéru (neboli schopnosti zařízení), přičemž jeho číselná hodnota může nabývat čísel v rozmezí 0-7, které dle normy předávají informace o tom, jaké typy zpráv může zařízení poskytovat. Pokud je tedy například CA = 5 (v binární soustavě 101) lze stanovit dle tabulky stanovit, že se jedná o cíl ve vzduchu a třída transpondéru 2+ (dodatečné informace oproti třídě 2 obsahující přehledové a identifikační informace), který může v průběhu času změnit svůj stav na CA = 7, tedy cíl buď ve vzduchu nebo na zemi. Třída transpondéru stanovuje i další vlastnosti a požadavky systému. [8]

AA představuje samotnou 24bitovou unikátní adresu transpondéru přiřazenou k letadlu, která se využívá k identifikaci.

PI neboli parita se používá k detekci chyb v přenosu zpráv. Princip této metody spočívá v tom, že je zpráva rozdělena na segmenty stejné délky a ke každému z nich je přidán jeden paritní bit. Paritní bit nabývá hodnot v závislosti na tom, zdali má segment lichý nebo sudý počet bitů. V případě DF 11 se v bloku PI přenáší adresa dotazovače, kterým bylo letadlo dotázáno, a jako zabezpečení je využívána technologie CRC (Kapitola 1.5.10 Kontrola parity a CRC).[8]

1.5.5 Surveillance Reply

Mezi základní krátké (56bitové) DF u mód S zpráv patří dvě základní informace o cíli a to barometrická výška (DF = 4) a identifikace (DF = 5). Obě DF jsou vyvolány adresními dotazy.

Tabulka 4 - Struktura Surveillance Reply [8]

Downlink Format	Flight Status	Downlink Request	Utility Message	Altitude/Identify	Parity
DF (5)	FS (3)	DR (5)	UM (6)	AC/ID (13)	AP (24)

Flight Status je informace o možné výstraze, pulz SPI a zdali je letadlo ve vzduchu nebo na zemi zakódovaná dohromady do 3 bitů.

Downlink Request představuje žádost typu vysílané odpovědi. V případě DF 4 a 5 může toto pole například obsahovat informaci o tom, že je vysílán požadavek odpovědět krátkou nebo dlouhou odpovědí.

Utility Message dokáže příjemce informovat o stavu komunikace transpondéru.

Barometrická výška je zakódována ve 13 bitech a řídí se hodnotami 7. a 9. bitu, které předepisují pravidla, jakými dekodovat přijatý rámeček. Pokud jsou všechny bity přijaty s nulovou hodnotou, nastává stav, kdy není záměrně předávána informace o barometrické výšce

Tabulka 5 - Barometrická výška Surveillance Reply [9]

7. bit	9. bit	Popis
0	0	Informace o barometrické výšce mohou být dekodovány jako u mód C
0	1	Řídící bity se vynechají a zbytek se dopočítává s krokem 25 stop
1	cokoliv	7. řídicí bit se vynechá a zbytek reprezentuje barometrickou výšku v metrech

Identifikace je zakódován v 13 bitech, které reprezentují čtyřmístný osmičkový „squawk“ kód stejně jako u módu A.

1.5.6 ACAS

Airborne Collision Avoidance System (ACAS) je technologie odvozená od principu mód S, která zajišťuje zvýšení bezpečnosti proti kolizím dvou letadel. Princip spočívá v kontinuálním vysílání dotazu v módu C (kvůli letadlům se starším A/C transpondérem) a následném příjmu odpovědi ze kterých je vyhodnocována výška a vzdálenost ostatních letadel v prostoru. Letadla vybavena mód S transpondérem pasivně přijímají DF 11 či DF 17, tedy ADS-B. V případě možné kolize systém dokáže upozornit pilota nebo doporučit vhodný manévr. ACAS je rozdělen do tří kategorií dle schopností.

ACAS 1 dokáže detekovat letadla na stejné, či podobné úrovni bez schopnosti doporučit pilotovi příslušný manévr pro vyhnutí se kolizi

ACAS 2 předává pilotovi informace o sledovaném cíli v horizontální i vertikální rovině a předepisuje příslušný manévr pouze ve vertikální rovině proti možné kolizi

ACAS 3 plní všechny funkce jako výše zmíněné kategorie s doplněnou možností kalkulace manévrů i v horizontální rovině.

V případě, kdy se jiné letadlo vyskytne v oblasti průzkumu letadla vybaveného systémem ACAS, vyšle odpovídač tohoto letadla dotaz UF 0 (air-air dotaz) a čeká na odpověď DF 0. Dotazování DF0 skončí, je-li druhé letadlo ve vzdálenosti delší než 3NM a ACASem vypočítaná doba do srážky je větší než 60 s. Přiblíží-li se ale druhé letadlo tak, že začne být hrozbou, ACAS iniciuje vysílání UF16, tj. snaží se s ním navázat komunikaci pro koordinaci vertikálních manévrů. Pro generování DF16 musí být odpovídač úrovně 2 a vyšší. Takto navázaná komunikace dvou letadel dokáže bezpečně koordinovat oba lety. [9]

1.5.7 Comm-B

Comm-B je protokol využívaný pro přenos různorodých zpráv jako například ACAS nebo meteorologická data. Tento protokol je přenášén v DF 20 a DF 21 (Obdobná struktura jako DF 4 a DF 5). Způsob dekodování a obsah zprávy je řízen prvními 8 bity obsažených v datovém souboru MB (Message neboli Comm-B), bez kterých by nebylo možné zprávu správně dekodovat. Na podobném principu pracuje i TC v kapitole 1.6.1 Formát ADS-B zpráv. V tabulce 5 jsou popsány základní typy řídicích bitů převedeny na dvoumístné hexadecimální číslo a klasifikace informací získaných po dekodování.

Tabulka 6 - Klasifikace informací obsahující blok MB pro mód S [8]

BDS		Popis
1	0	Zpráva o schopnosti datového spoje
1	7	Zpráva o schopnostech GICB
2	0	Identifikace letadla
3	0	Aktivní RA
4	0	Vybraný vertikální záměr
5	0	Hlášení o sledování a otáčení
6	0	Hlášení o směru a rychlosti
4	4	Meteorologická zpráva o ovzduší
4	5	Meteorologická zpráva o nebezpečí

Tabulka výše popisuje pouze základní typy zpráv, které lze rozdělit do čtyř kategorií, přičemž prvních 4 BDS se řadí do kategorie ELS (Mode S Elementary Surveillance), která se zaměřuje na předávání základních informací o letadle. Další trojce BDS v tabulce je označována jako EHS (Mode S Enhanced Surveillance), která rozšiřuje získané informace o další důležité vlastnosti letadla jako je například typ letadla a motoru, přesnější barometrická výška apod. Dvojce BDS 44 a BDS 45 dekodují zprávy nesoucí meteorologické informace. Posledních 5 uvedených příkladů BDS v tabulce se řadí k technologii ADS-B, nicméně princip dekodování je stejný. [9]

1.5.8 ELS

BDS 0,1 – Zpráva o schopnosti datového spoje je využívána pro přehled možností daného transpondéru, přičemž obsahem této zprávy může být například informace o verzi norem používaných konkrétním transpondérem, zdali je podporována možnost parity, ACAS nebo Callsign.

BDS 1,7 – Tato zpráva je používána jako přehled všech možných BDS, se kterými dokáže transpondér pracovat. Metoda nese název Common Usage Ground-initiated Comm-B (GICB) a její dekodování je možné provést pomocí očíslovaného seznamu všech možných BDS, přičemž každý bit v řadě dekodován jako logická jednička odpovídá pozici v tabulce.

BDS 2,0 – Dekóduje takzvaný callsign, který je používán jako další možnost identifikace letadla. Callsign obsahuje 8 znaků po šesti bitech, přičemž číslo odpovídající kombinaci šesti bitům dekoduje jeden znak pomocí ASCII tabulky.

BDS 3,0 – Se používá k získávání informací ze systému ACAS. Obsahem zprávy poté může být indikace vícečetných hlášení o možné kolizi letadel včetně doporučených manévrů.

1.5.9 EHS

BDS 4,0 – Předává informace řídicímu letového provozu o záměru, které letadlo plánuje vykonat ve vertikální rovině, což umožňuje kontrolu příkázané letové hladiny, ve které se letadlo nachází a zda nemůže dojít k porušení pravidel.

BDS 5,0 – Představuje hlášení o zatáčkách letadla, používané z bezpečnostních důvodů, a především pro popis dráhy letadla. Součástí zprávy je mnoho informací souvisejících s natočením letadla, včetně pozemní rychlosti a skutečné rychlosti TAS, která udává relativní rychlost letadla k okolnímu vzduchu.

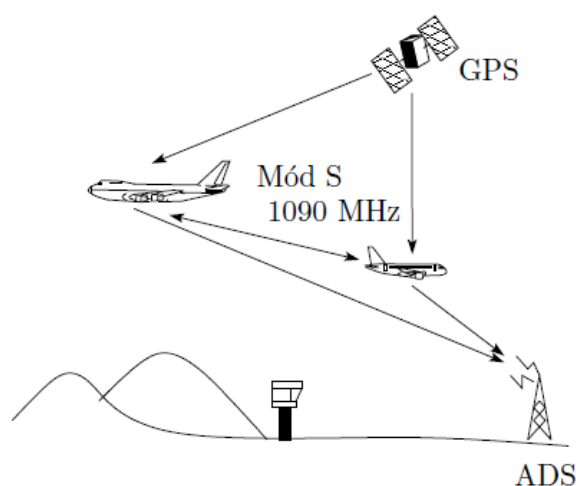
BDS 6,0 – Informuje řídicí letového provozu o kurzu a rychlosti letadla. Zpráva obsahuje informace o rychlosti letadla IAS získané z měření tlaku vzduchu, poměr rychlosti letadla k rychlosti zvuku ve stejném prostředí (Machovo číslo), barometrická rychlost výšky (sleduje změny výšky letadla v průběhu letu), Inerciální vertikální rychlost (nezávislá na vlivu prostředí) a magnetický směr, který poskytuje navigační informace vztahené k zemským magnetickým pólům.

1.5.10 Kontrola parity a CRC

Během přenosu S módových zpráv neboli obecně při jakémkoliv přenosu digitálního signálu dochází k chybovosti přijaté zprávy z několika negativních vlivů, jako například šum způsobený přenosem. V praxi se poté k přenášeným bitům přidávají redundantní bity, které napomáhají různým metodikám k detekci a opravám přijatého signálu. Mód S (včetně ADS-B) využívá metodu CRC (Cycling Redudancy Check) k detekci chyb. CRC po přijetí signálu dokáže odhalit chybu, nemá schopnost ji opravit, ale oznamuje ji a umožňuje přijímači podniknout odpovídající kroky, jako například žádost o zopakování dotazu či vyvolání výstrahy o chybném přenosu. ADS-B využívá posledních 24 bitů pro paritu a adresu letadla nebo kód dotazovače. [9]

1.6 ADS-B

Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) je technologie zaměřená převážně na oblast sledování letového provozu, ale i například na sledování dronů nebo objektů v oblastech letišť.



Obrázek 15 - Princip funkce systému ADS-B [1]

Základní princip této technologie plyne ze samotného názvu, přičemž slovo „Automatic“ poukazuje na schopnost automatizace systému bez nutnosti zásahu samotným pilotem. Slovo „Dependent“, neboli závislý znamená, že systém je závislý na datech z palubních systémů jako jsou datové a navigační systémy. „Surveillance“ značí, že se jedná o přehledový systém, který má za úkol předávat informace mezi cíli nebo pozemním přijímacím stanicím. „Broadcast“ vychází z IT terminologie a jedná se o typ zprávy, která může být přijatá jakýmkoliv zařízením umožňující zpracovávat S módové zprávy, konkrétně DF17 a DF18. [9]

1.6.1 Formát ADS-B zpráv

Struktura ADS-B datové zprávy (nazývaná Extended squitter) je vázána standardem (ICAO) obdobně jako mód S, mezi které se ADS-B řadí, jelikož je používán v rámci mód S transpondéru. Struktura rámce o délce 112 bitů je popsána níže. Počet bitů je uveden v binární soustavě.

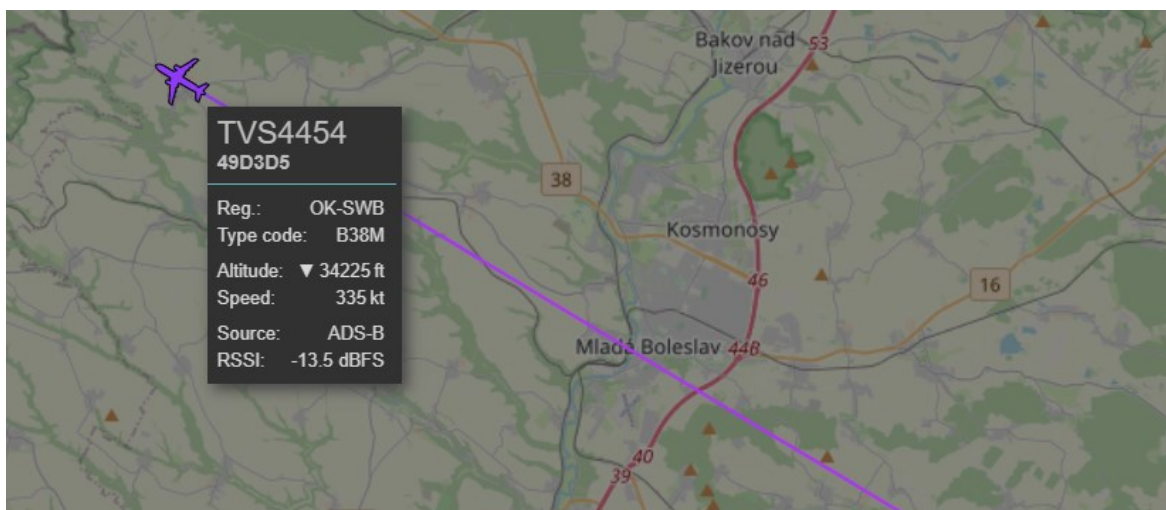
Tabulka 7 - Obecná struktura ADS-B zprávy [9]

Downlink Format	Capability	ICAO Address	Message	Parity/Interrogator ID
DF (5)	CA (3)	ICAO (24)	ME (56)	PI (24)

DF zde může nabývat dvou hodnot pro civilní ADS-B. První možností je DF = 17 (v binární soustavě 10001), která informuje o tom, že zpráva pochází z Mode S transpondéru. V druhém případě DF = 18 (v binární soustavě 10010) se jedná o informaci, že zpráva pochází ze zařízení, které není založeno na principu práce s transpondérem nebo TIS-B (Traffic Information Service), která poskytuje předávání informací mezi piloty.

CA sdílí stejné vlastnosti jako v případě běžných zprávách v módu S (viz. kapitola č. 1.5.4 All-Call Reply).

ICAO je používán k identifikaci vysílajícího objektu a též se jedná o adresy, které jsou předepsány normami ICAO. Každá z adres by měla být jedinečná, jelikož je přiřazena každému letadlu, které má jeden nebo více odpovídačů pracujících v módu S.



Obrázek 16 - Příklad unikátní ICAO adresy trackovaného cíle [10]

Na obrázku č. 16 je příklad ICAO adresy v reálném prostředí získané pomocí ADS-B. Standardně se adresa reprezentuje v hexadecimálním tvaru, a to v šesti znacích.

ME zastupuje samotnou zprávu v ADS-B rámci, která obsahuje samotné parametry cíle jako je například identifikace letadla, pozice ve vzduchu, pozice na zemi, rychlost ve vzduchu a další. Blok začíná takzvaným Type Code, který klasifikuje druh předávané informace. V tabulce níže jsou rozděleny druhy informací obsažené v ME pomocí TC.

Tabulka 8 - Klasifikace informací obsahující blok ME pro ADS-B [9]

Type Code (TC)	Obsah rámce
1-4	Identifikace letadla (Callsign)
5-8	Pozice na zemi
9-18	Pozice ve vzduchu (Barometrická výška)
19	Rychlost ve vzduchu
20-22	Pozice ve vzduchu (GNSS)
23-27	Rezervováno
28	Status letadla
29	Stav a status cíle
31	Operační status letadla

Je nutné rozlišovat pozici ve vzduchu a stojícího cíle z důvodu frekvence odesílání jednotlivých zpráv, kdy je žádoucí, aby letadlo ve vzduchu častěji vysílalo svou pozici a stavu v porovnání s letadlem na zemi.

PI sdílí stejné vlastnosti jako v případě běžných mód S zprávách (viz. kapitola č. 1.5.4 All-Call Reply)

1.6.2 Identifikace letadla

Důležitou informací, která je obsažená v ADS-B zprávě je identifikace letadla, také nazývaná jako „callsign“. Tento identifikátor není unikátní, jelikož se v praxi používá například pro identifikaci letové trasy letadla.

Tabulka 9 - Rámec ADS-B – Identifikace letadla [8]

TC (5)	CA(3)	C1(6)	C2(6)	C3(6)	C4(6)	C5(6)	C6(6)	C7(6)	C8(6)
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V tabulce č. 8 je popsána struktura rámce popisující identifikaci letadla, který je obsažen v S módové zprávě. Čísla v závorkách značí počet bitů. Transponder Code (TC) je tvořen

skupinou 5 bitů, zatímco Aircraft Category (CA) zabírá 3 bity. Číselná hodnota těchto prvků vytváří specifickou kombinaci, která má za účel klasifikaci letadel do příslušných kategorií. Zbylé prvky C1-C8 reprezentují jednotlivé znaky identifikace (call-sign).

1.6.3 Pozice letících cílů

Zpráva o pozici letících cílů se využívá pro získání informace o pozici vyjádřené v geografických souřadnicích a výšce letadla. Struktura rámce ADS-B zprávy obsahující informace o výšce a pozici letadla je v tabulce níže

Tabulka 10 - Rámec ADS-B – Pozice ve vzduchu [8]

TC(5)	SS(2)	SAF(1)	ALT(12)	T(1)	F(1)	LAT(17)	LON(17)
-------	-------	--------	---------	------	------	---------	---------

Obdobně jako rámec pro identifikaci letadla začíná tento rámec položkou Type Code, který klasifikuje způsob určení výšky letadla. TC v rozmezí 9-18 stanovuje stav výšky pomocí barometrického měření a TC 20–22 informaci o výšce s pomocí GNSS. Pozice ve vzduchu je reprezentována ve formátu vypočtené zeměpisné šířky, délky z údajů nacházející se v přijatém rámci a barometrické/GNSS výšky. Extrahovaná data z odpovědi nicméně popisuje pozici ve formátu CPR (Compact Position Reporting), který využívá menší počet bitů pro zakódování polohy s vysokým rozlišením. Princip, na kterém lze dekodovat polohu cíle vychází z metody střídavého vysílání dvou typů zpráv označené lichým a sudým bitem rámce.

1.6.4 Pozice pozemních cílů

V případě, že letadlo nebo cíl se nachází na zemi, je zapotřebí využívat odlišný typ zprávy, který zahrnuje kromě pozice také rychlost, směrový úhel cíle a odpadá naopak informace o výšce.

Tabulka 11 - Rámec ADS-B – Pozice na zemi [8]

TC(5)	MOV(7)	S(1)	TRK(7)	T(1)	F(1)	LAT-CPR(17)	LON-CPR(17)
-------	--------	------	--------	------	------	-------------	-------------

Pozemní rychlost cíle je kódována nelineárně s využitím odlišných kvantizačních úrovní z důvodu přesnějšího rozlišování nižších rychlostí od vyšších.

Princip získání pozice letadla je stejný jako v případě pozice ve vzduchu a vychází ze stejných metodik popsaných v kapitole 1.6.3 Pozice letících cílů.

1.6.5 Pozice ve vzduchu

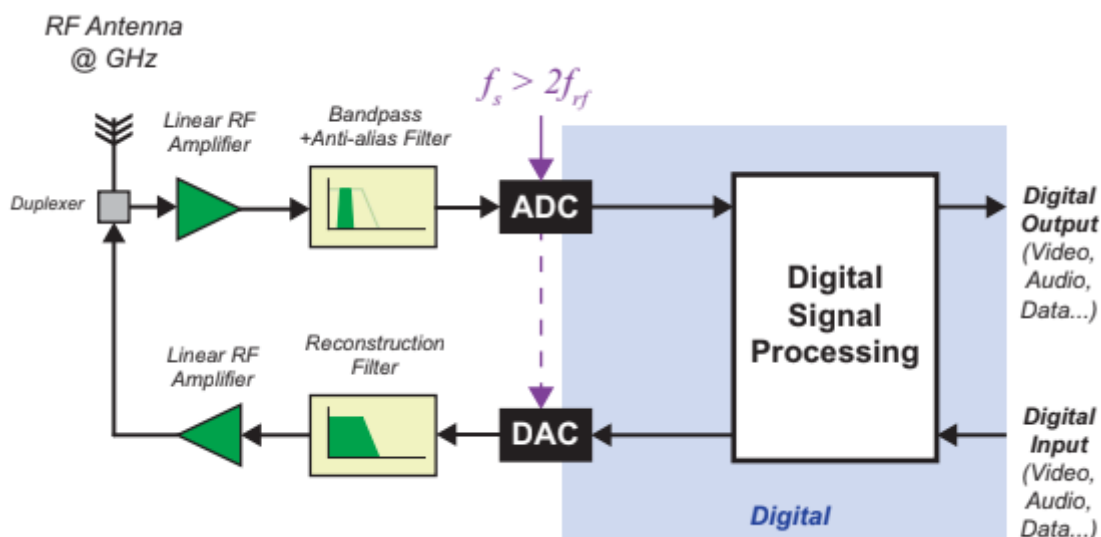
Obsahem datové zprávy mohou být informace o rychlosti letadla, vertikálním a horizontálním pohybu, což má za důsledek podrobnější přehled o pohybu. Z této datové zprávy je možné stanovit pozici letadla, která může být z těchto informací vypočítána, pokud ji není možné určit z GNSS. Rychlost dle typu zprávy může být pravá vzdušná rychlost nebo rychlost vůči zemi. [9]

1.6.6 Provozní status

Zpráva o provozním statusu letadla je určena k poskytování různých informací o letadle jako jsou například provozní schopnosti v okolí terminálů a ranvejí, nebo například operační stav letadla při přistávání či vzletání. V průběhu vývoje technologie ADS-B a omezené délce zprávy se v různých verzích mění obsahy těchto zpráv, kde kupříkladu přibyla informace o využívané verzi ADS-B zpráv (0, 1 nebo 2), přesnost či integritu systému.[9]

1.7 Softwarově definované rádio

Softwarově definované rádio je zařízení sloužící například k zpracování, vysílání či přijímání příslušných rádiových signálů. Podstatou zařízení je již zmíněné zpracování signálu, které je realizováno programovatelnými obvody uvnitř systému. Výhodou takového zařízení je především univerzálnost, co se týče praktického použití. [11]



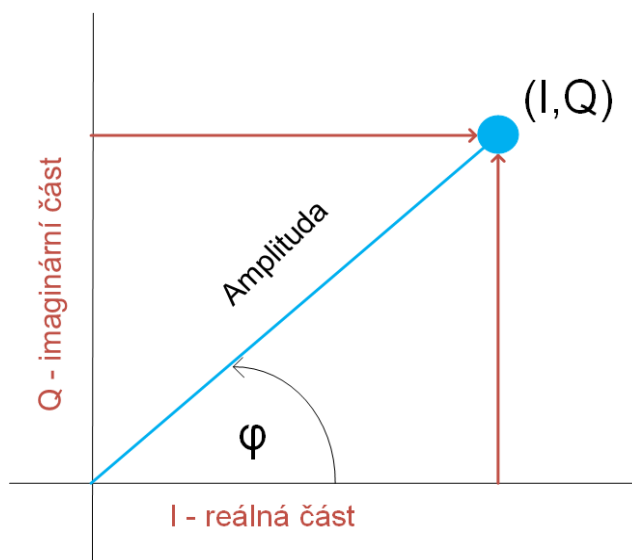
Obrázek 17 - Koncept obecného SDR [11]

Princip SDR je zobrazen na obrázku výše. První část systému se skládá z radiofrekvenční části, která obsahuje anténu připojenou na duplexer, který umožňuje obousměrnou komunikaci a je tedy možné anténu používat pro příjem nebo vysílání. Přijatý signál vstupuje v přijímací části SDR do lineárního RF zesilovače, který zesiluje vlivem šíření elektromagnetické vlny prostředím oslabený signál. Další v pořadí je pásmový filtr společně s anti-aliasing filtrem, přičemž pásmový filtr umožňuje průchod signálům v určitém frekvenčním rozsahu, zatímco potlačuje signály mimo pásmo a tím umožňuje selektivně zpracovávat signál. Anti-aliasing filtr se používá při digitalizaci analogového signálu z důvodu odfiltrování vyšších frekvenčních složek signálu z důvodu potlačení zkreslení. Před samotným blokem zajišťující zpracování digitálních signálů (DSP) se nachází převodník analogového signálu na digitální. Výstupem bloku DSP je poté digitální IQ (In phase and Quadrature phase) signál.

Ve vysílací části je vstupem do DSP digitální signál (IQ), který je zpracován a pokračuje na převodník digitálního signálu na analogový. Převedený analogový signál vstupuje do rekonstrukčního filtru, který omezí šum a eliminuje vyšší harmonické, což vyhladí ostré hrany a vytvoří tak plynulý analogový signál. Před samotným vysíláním takto rekonstruovaného signálu dojde k zesílení na požadovaný výkon. [11]

1.7.1 IQ data

IQ data neboli „In-phase“ (ve fázi) a „Quadrature“ (kvadrurní) reprezentují signál pomocí dvou parametrů. Reálná složka signálu „I“ představuje okamžitou úroveň amplitudy signálu a „Q“, tedy imaginární složka, nese stejnou informaci s pouhým rozdílem -90° ve smyslu fázového posunu. Signál vyjádřený v takovém tvaru je v praxi využíván v zařízení SDR kvůli svým vlastnostem, a to především kvůli možnosti stanovit jedním zápisem komplexní tvar signálu a určit tak amplitudu a fázi. IQ data vznikají v A/D převodníku a jsou dále využívána pro řadu dalších zpracování, mezi které patří demodulace nebo dekódování v digitální vrstvě systému bez potřeby fyzické přítomnosti logických obvodů. Tento způsob poskytuje vysokou flexibilitu ve smyslu implementace řady metodik určené pro zpracování signálů. Obrázek č. 18 popisuje vzorek signálu v komplexním tvaru zobrazující I a Q složku. [12]



Obrázek 18 - Princip IQ dat

IQ data lze prezentovat několika matematickými zápisy, přičemž každý z nich je vhodný pro odlišný druh implementace do systému. Kartézská forma zápisu, tedy součet v komplexní rovině reálné složky I a imaginární složky Q, představuje IQ data jako pozici v souřadnicovém systému. IQ data bývají často vyjádřeno v modelu úzkopásmového signálu popisující vzorec č. (1.3)

$$A(t) \cdot \cos[2\pi ft + \varphi(t)] = \cos(2\pi ft) \cdot A(t) \cos[\varphi(t)] - \sin(2\pi ft) \cdot A(t) \sin[\varphi(t)], \quad (1.3)$$

kde $A(t)$ – je amplituda signálu závislá na čase,

f – je frekvence nosného signálu,

t – čas,

$\varphi(t)$ – je fáze signálu závislá na čase,

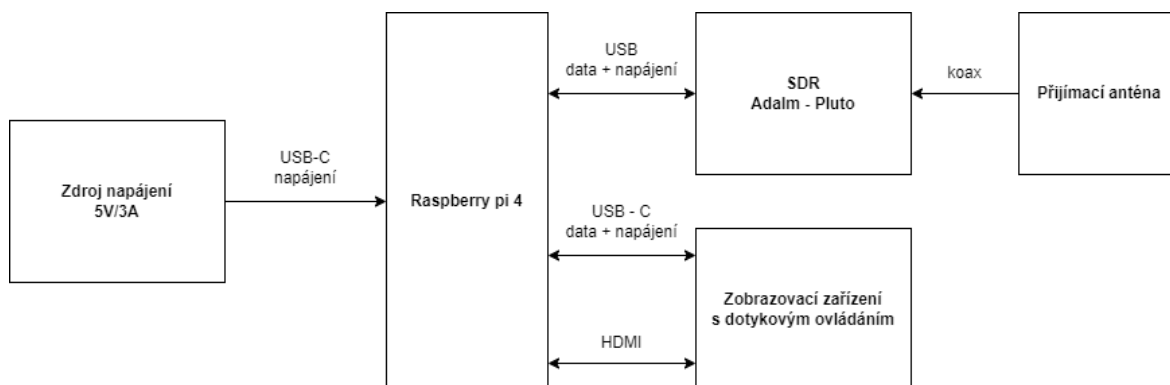
$\cos(2\pi ft) \cdot A(t) \cos[\varphi(t)]$ – je reálná složka signálu (I),

$\sin(2\pi ft) \cdot A(t) \sin[\varphi(t)]$ – je imaginární složka signálu (Q).

2 Použitý hardware

2.1 Popis systému

Hlavním požadavkem na architekturu celého systému je kromě zajištění požadované funkce především mobilita, kvůli možnosti používat přijímač v terénu bez nutnosti navržený systém obtížně přemísťovat. V případě návrhu staticky umístěného systému by bylo výhodou použití síťového napájení, u mobilního systému je však zapotřebí navrhnout takový zdroj, který dokáže napájet systém bez připojení k síti 230 V. V samotném návrhu systému zastupuje klíčovou roli softwarově definované rádio, tedy zařízení schopné přijímat a zpracovávat signál. Příjem signálu je zajištěn pomocí antény pracující na frekvenci 1090 MHz. Jelikož je systém koncipován s ohledem na kompaktnost a přenosnost, zahrnuje návrh propojení komponentů přes mikropočítač. Pro zajištění nezávislého napájení a snadné mobility systému je využívána powerbanka, která napájí mikropočítač. Samotný mikropočítač poté distribuuje napájení pro softwarově definované rádio a zobrazovací zařízení, které zároveň dovoluje uživatelské ovládání softwaru. Na obrázku níže je popsáno blokové schéma popisující zapojení jednotlivých komponentů a zároveň výběr hardwaru.



Obrázek 19 - Blokové schéma hardwarové části systému

2.2 Adalm-Pluto

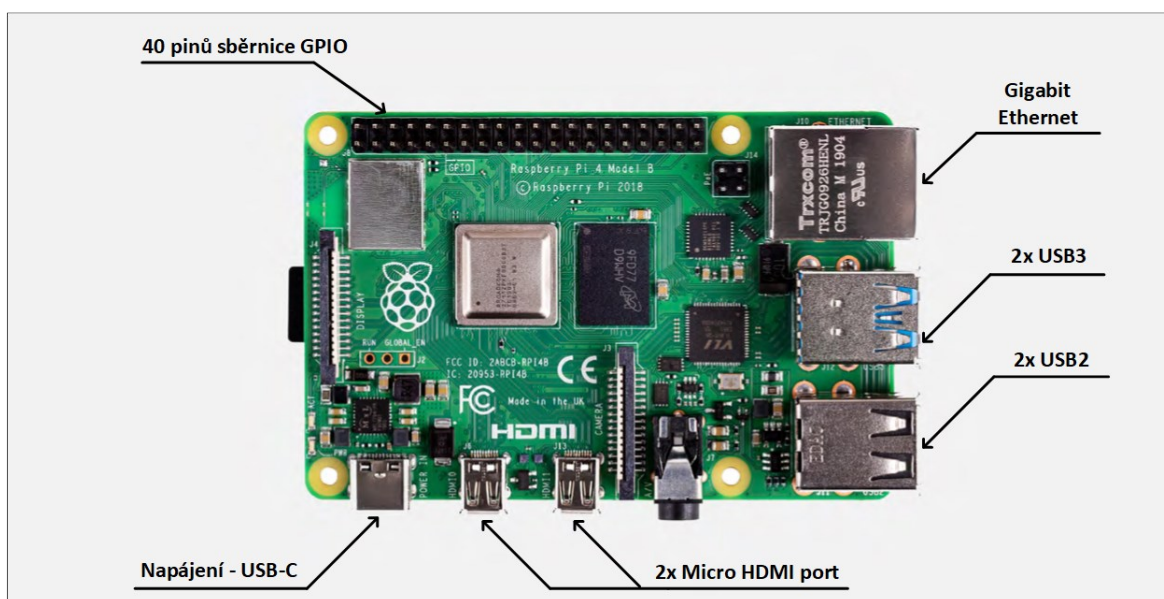
Pro návrh hardwarové části diplomové práce bylo vybráno softwarově definované rádio Adalm-Pluto (viz. obrázek č. 20) vyráběné firmou Analog Devices. Jedná se o cenově dostupné zařízení s ohledem na jeho funkce a parametry, které je kompatibilní s mnoha programovacími jazyky jako například C, C#, Python, Matlab a další. Mezi podporované operační systémy, se kterými SDR dokáže pracovat jsou Windows, Linux, Mac a především embedded linuxové platformy jako například Raspberry Pi a další. [13]



Obrázek 20 - SDR Adalm-Pluto

2.3 Raspberry Pi 4

Raspberry Pi je jednodeskový mikropočítač vyvinutý britskou nadací Raspberry Pi Foundation. Jedná se o zařízení, které disponuje vysokým výkonem s ohledem na nízkou cenou. Zařízení je často využíváno jako centrální prvek pro propojení HW zařízení. V diplomové práci byla použita 4. generace Raspberry s velikostí paměti RAM 8 GB.[14]



Obrázek 21 - Popis konektorů Raspberry Pi 4 B [14]

2.3.1 Konektivita

Zařízení má k dispozici 40-pinovou sběrnici GPIO, která umožňuje připojení různorodého HW. Pomocí této sběrnice je tedy možné sbírat data, ovládat či regulovat připojený HW, či komunikovat s ostatním HW.

Raspberry dále nabízí dva páry rozhraní USB 2 a USB 3, přes které lze zařízení napájet a komunikovat s ostatními zařízeními či připojit periferie (klávesnice, myš) a ostatní HW.

Připojení k síti je možné přes síťový kabel, který propojí síťové zařízení (například switch) a Gigabit ethernetové sběrnice umístěné přímo na desce. Další možností propojení Raspberry k síti je pomocí Wi-Fi (v pásmu 2,4 GHz a 5 GHz).

2.3.2 Operační systém

Operační systém je uložen na Micro SD kartě, která musí být připojena k zařízení. Oficiálním operačním systémem je Raspbian, nicméně je možné na zařízení používat i jiné alternativní operační systémy dle potřeby.

2.3.3 Napájení

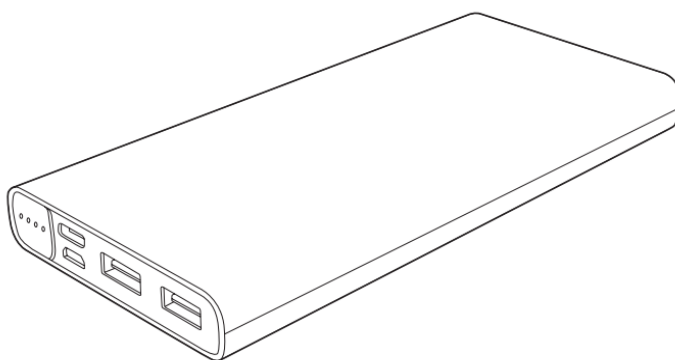
Raspberry Pi 4 vyžaduje zdroj napájení 5V DC s proudem minimálně 3A. Existují tři varianty možného napájení zařízení a to:

- USB-C konektor
- GPIO sběrnice
- PoE – napájení přes Ethernet (vyžaduje přídatný modul)

Pro návrh mobilního zařízení byla použita varianta napájení přes USB-C konektor z powerbanky poskytující stejnosměrné napětí 5V a maximální odběr proudu 3A.

2.4 Zdroj napájení – Powerbanka

Zdrojem napájení pro Raspberry Pi 4 je powerbanka značky AlzaPower. Mezi hlavní vlastnosti tohoto zařízení patří funkce Smart IC, která automaticky detekuje připojená zařízení a začne do nich dodávat energii. Mezi bezpečnostními funkcemi zařízení patří ochrana proti přepětí, ochrana proti přetížení, ochrana proti zkratu, ochrana proti přehřátí, ochrana proti přebíjení a ochrana proti nedostatečnému nabití. [15]



Obrázek 22 - Powerbanka AlzaPower 20 000 mAh [15]

Baterie Li-Pol o kapacitě 20 000 mAh se nachází uvnitř krytu zařízení. Kryt je vyroben z velmi odolného nehořlavého materiálu, který je v souladu se standardem UL94, který udává míru hořlavosti. Provozní teplota zařízení se pohybuje mezi 0° C do 40° C. Celková hmotnost zařízení je 386 g. [15]

Nabíjet powerbanku je možné pomocí USB-C konektoru, a to DC 5V/2A, který může být zároveň využit jako výstup který dokáže dodávat DC 5V/3A, 9V/2A nebo 12V/1,5A (nebo DC 9V/2A) a nebo MicroUSB konektorem DC 5V/2A. Powerbanka má dva USB-A výstupy s parametry stejnými jako USB-C konektor. [15]

2.4.1 Distribuce napájení

Powerbanka napájí mikropočítač Raspberry Pi 4 výstupem 5 V s průměrným odběrem proudu 1200-1400 mA při plném vytížení. SDR je napájeno přímo z mikropočítače, jelikož využívá společnou sběrnici USB pro přenos dat a samotné napájení. Adalm-Pluto požaduje napětí 5 V s průměrným odběrem proudu 500-550 mA. Poslední část využívající napájení z powerbanky je dotykový displej, který je napájen 5 V přímo z mikropočítače s průměrným odběrem 450 mA.

Pro nabití powerbanky je zapotřebí odpojit napájecí kabel od zařízení raspberry a využít jednu ze dvou možností pro dobíjení. Instalace samotné powerbanky pomocí suchého zipu umožňuje snadné vyjmutí zařízení z ochranného krytu.

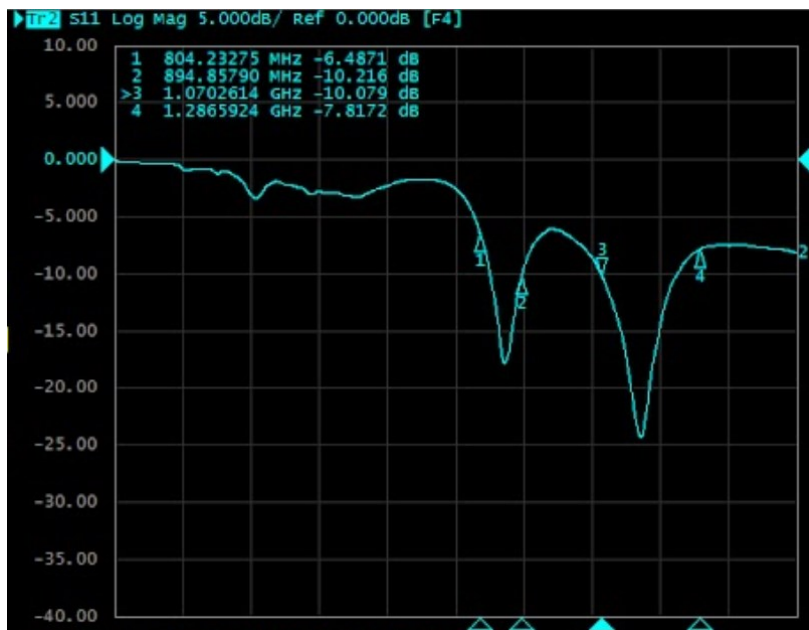
2.5 Anténa přijímače

Výběr vhodné antény pro navrhovaný systém je závislý na velikosti zisku na požadované pracovní frekvenci, ale také na fyzikálních rozměrech a hmotnosti z hlediska mobility. Dalším požadavkem na anténu je vertikální polarizace z důvodu optimalizace příjmu signálu vzhledem k polarizaci S módových zpráv. Anténa je pro účely diplomové práce používána pouze pro příjem signálu, proto je zapojena do SMA konektoru označeného „RX“ zařízení Adalm-Pluto. [16]

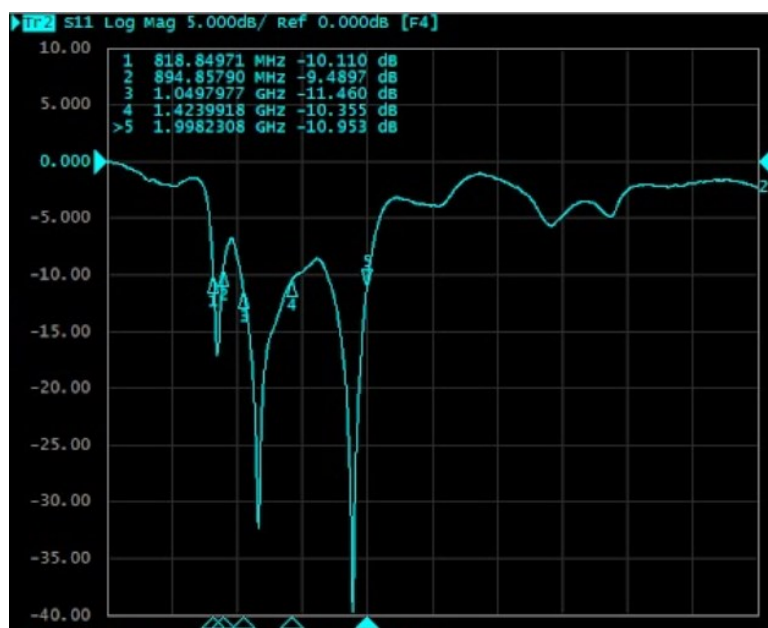


Obrázek 23 - Anténa VERT900

Pro návrh diplomové práce byla použita anténa VERT900, která je na obrázku č. 23. Obrázky č. 24 a 25 ukazují impedanční přizpůsobení této antény (S11 parametry).



Obrázek 24 - Impedanční přizpůsobení antény – S11 parametry, rozsah 1,5 GHz



Obrázek 25 - Impedanční přizpůsobení – S11 parametry, rozsah 5 GHz

2.6 Dotykový displej

Jako zobrazovací jednotka pro prezentaci zaznamenaných zpráv a zároveň nástroj pro konfiguraci navrhnutého programu byl vybrán displej 70H-1024600 od firmy Waveshare. Jedná se o sedmpalcový displej s rozlišením 1024 x 600 pixelů, využívající technologii IPS pro kvalitní zobrazení barev a textu například na slunci v terénu. Displej je připojen k mikropočítači Raspberry Pi 4 pomocí HDMI kabelu, který zajišťuje přenos obrazu, a pomocí USB-C umožňujícím přenos dotykových gest. Požadované napájení displeje je 5 V s průměrným odběrem proudu 450 mA. [17]



Obrázek 26 - Dotykový displej Waveshare 7" [17]

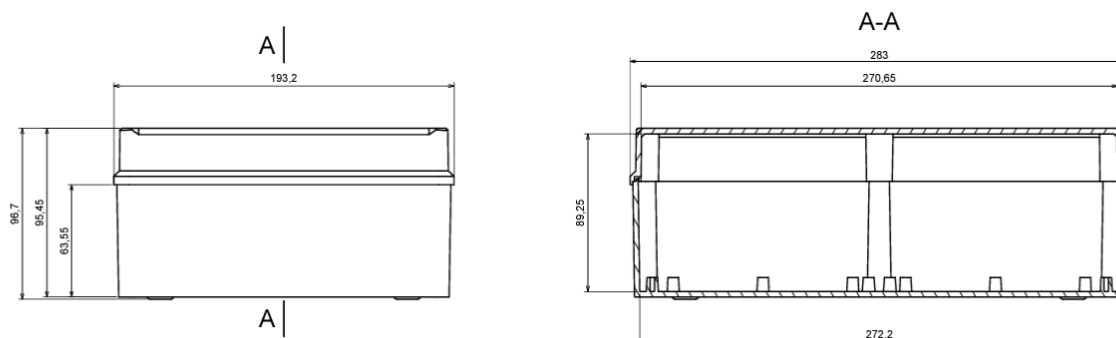
2.6.1 Konfigurace displeje

Pro připojení displeje k mikropočítači Raspberry Pi 4 je zapotřebí propojit, kromě výše zmíněných HDMI a USB-C kabelů, také 40-pinový FPC kabele mezi displej a DEMO desku. Ta obsahuje převodníky na jiné typy konektorů. Kabel HDMI – micro HDMI a USB-C propojují DEMO desku s Raspberry.

V softwarovém prostředí je nutné změnit konfiguraci. Jedním z možných postupů je otevření souboru „config.txt“ v počítači ve kterém je připojena SD karta obsahující operační systém a data zařízení Raspberry Pi 4.

2.7 Kryt systému

Nejvhodnějším krytem z hlediska rozměrů a cenové kategorie byla vybrána univerzální plastová krabička vhodná pro elektroinstalace. Kryt disponuje odnímatelným víkem, ve kterém je zabudován dotykový displej 70H-1024600. Na obrázku č. 27 jsou popsány rozměry krytu.



Obrázek 27 - Rozměry plastového krytu pro HW [18]

Obrázek č. 28 znázorňuje rozložení jednotlivých zařízení uvnitř krytu s odklopeným horním víkem. Adalm-Pluto je uchycen pomocí držáku vytisknutém na 3D tiskárně, který je pevně připevněn ke dnu krytu. Powerbanka společně s mikropočítačem Raspberry, jsou připevněny uvnitř krytu pomocí suchého zipu z důvodu jednoduché manipulace s moduly. Na boku ochranného krytu přístroje je připraven otvor pro instalaci antény k zařízení Adalm-Pluto.



Obrázek 28 - Kompozice hardwaru uvnitř krytu

Dotykový displej je vsazen do horního víka ochranného krytu viz obrázek č. 29



Obrázek 29 - Horní kryt

3 Vývoj softwaru

3.1 Spouštění zařízení a programu

Mikropočítač Raspberry vyžaduje napájení 5 V, přičemž ihned po připojení ke zdroji napájení začne odebírat proud a přejde do zapnutého stavu. Princip navrženého řízeného zapínání a vypínání systému spočívá v aktivním monitoringu GPIO sběrnice s pomocí daemona, který je aktivní na pozadí operačního systému. Tlačítko pro zapnutí a vypnutí je připojeno k pinu 5 (SCL), který jako jediný dokáže zaznamenat stisknutí tlačítka, když je Raspberry vypnuté a k pinu 6, který plní funkci země. Softwarová část řešení byla převzata z veřejného zdroje pi-power-button [19]. Daemon zajišťuje monitoring pinů 5 a 6, které po sepnutí tlačítka vyvolají bootování Raspberry při vypnutém stavu, a naopak při sepnutí během zapnutého raspberry dokážou zařízení vypnout.

Jelikož je Raspberry Pi 4 využíváno výhradně pro provoz navrženého programu, byla implementována systémová služba, která tento program automaticky spustí při startu systému. Služba byla nakonfigurována tak, aby se spustila po načtení základních systémových služeb, a před samotným spuštěním programu počká 5 sekund. Tímto způsobem je zajištěno, že je program spuštěn bez nutnosti manuálního zásahu po každém restartu Raspberry Pi 4.

```
[Unit]
Description=DP Mode-S Rx Service
After=multi-user.target

[Service]
ExecStart=/usr/bin/python3 /home/jan/DP_ModeS_DF.py
WorkingDirectory=/home/jan
StandardOutput=inherit
StandardError=inherit
Restart=always
User=jan
Environment=PYTHONUNBUFFERED=1
ExecStartPre=/bin/sleep 5

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

3.2 Konfigurace SDR a Raspberry Pi 4

Zařízení Adalm-Pluto podporuje konfiguraci firmwaru, která umožňuje například výběr IP adresy nebo inicializaci USB portu. Před prvním spuštěním SDR je nutné aktualizovat firmware na poslední verzi v0.38 a nainstalovat knihovny, které umožní počítači či mikročipu navázat komunikaci s SDR. Při prvním spuštění Adalm-Pluto je zapotřebí připojit zařízení k počítači s nainstalovanými knihovnami a spustit aktualizaci firmwaru. V dalším

kroku je žádoucí spustit kalibraci zařízení, aby byly správně nakonfigurovány všechny jeho porty, byla mu přiřazena IP adresa a další potřebné laditelné parametry. [20]

Raspberry má nainstalovaný operační systém Raspbian GNU/Linux 11 (bullseye) release 2024-03-12 na 64 GB SD kartě, která je zároveň využívána jako datové úložiště. Pro snadné ovládání je v zařízení nainstalován open-source digitální klávesnice, která umožní plně ovládat zařízení i s pomocí dotykového displeje. Potřebný software a knihovny pro spuštění navrženého programu jsou popsány v následující kapitole.[21]

3.3 Použité knihovny a nástroje

Libio je open source knihovna vyvinuta společností Analog Devices Inc., která umožňuje komunikaci mezi hardwarovým zařízením Adalm-Pluto a Raspberry Pi 4. Knihovna disponuje snadnou manipulací s daty a řízení vstupně-výstupních operací mezi zmíněnými jednotkami. [22]

Python3 představuje třetí generaci programovacího jazyka Python s velikou komunitní podporou, který je v této práci používán pro dekodování přijatých zpráv. [23]

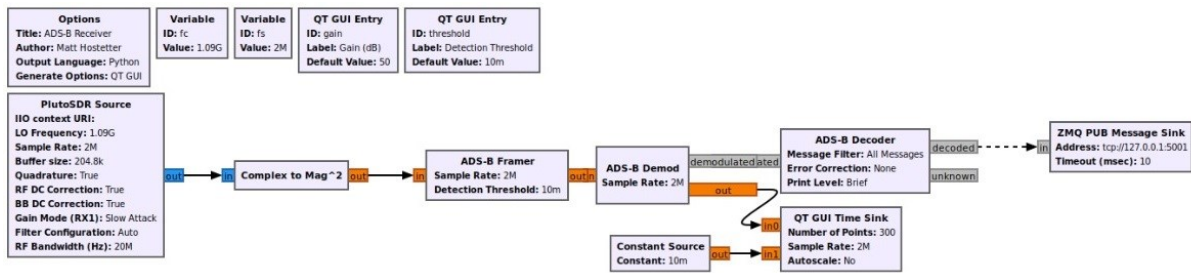
GNU Radio je open-source nástroj pro zpracování signálů podporující většinu známých softwarově definovaných rádií. Nástroj umožňuje uživateli vytvářet projekty pomocí graficky zpracovaného programování. Hlavní výhodou je možnost využít programovací jazyk Python pro zpracování signálů, konfiguraci SDR a především vývoj a úpravu funkčních bloků, neboli části kódů. [24]

gr-adsb je rozšiřující modul pro GNU Radio, který přidává možnost využívat funkční bloky jako například dekodování přijatého signálu a jeho klasifikaci dle typu Mode S zprávy. Knihovna zároveň disponuje doplňkovými funkcemi, jako je například zobrazení přijatých zpráv na webovém serveru. [25]

Další potřebné knihovny jsou instalované v rámci instalace knihovny gr-adsb a GNU Radio.

3.4 Popis navrženého programu

Navržený program umožňuje zpracování a analýzu přijatých Mode S zpráv, který je spustitelný prostřednictvím GNU Radio. Jádrem programu jsou podporované funkce z knihovny gr-adsb, které podporují příjem Mode S společně s ADS-B. Pro účely diplomové práce byly využity tyto funkce, které byly upraveny a doplněny, jako například filtrace zpráv, grafické zobrazení barometrické výšky letadla, záznam zpráv a dekodovací řetězec pro dotazy (UF). Na obrázku č. 30 je příklad grafického rozhraní GNU Radio, ve kterém lze program řídit, nicméně program lze spouštět s pomocí příkazové řádky a voláním propojeného kódu v Pythonu. Spuštění kódu z příkazové řádky umožňuje ovládání vedlejších subprogramů. Spustit program nakonfigurovaného pro příjem DF lze ze souboru „DP_ModeS_DF.py“ a program pro příjem UF s pomocí souboru „DP_ModeS_UF.py“.



Obrázek 30 - Grafické prostředí GNU Radio

Veškeré zpracování je rozděleno do několika podpůrných částí, které zajišťují postupné zpracování signálu přijatého anténou až po dekodování a vizualizaci výsledků. Řídící část (DP_ModeS_DF.py nebo DP_ModeS_UF.py) obsahuje hlavní cyklus, který zajišťuje zobrazení grafického rozhraní, které zobrazuje dekodované zprávy v terminálovém okně a graf zobrazující příjem IQ dat v reálném čase. Cyklus postupně zpracovává přijatý signál a volá vedlejší části kódu jako je „framer.py“ zajišťující rámcování signálu dle specifikace Mode S, dále „demod.py“, který převádí signál na digitální data a v neposlední řadě „decoder.py“ s pomocí kterého jsou data klasifikována a dekodována viz. kapitoly č. 1.5 Mode S a 1.6 ADS-B.

```
self.msg_connect((self.adsb_decoder_0, 'decoded'), (self.zeromq_pub_msg_sink_0, 'in'))
self.msg_connect((self.adsb_demod_0, 'demodulated'), (self.adsb_decoder_0, 'demodulated'))
self.connect((self.adsb_demod_0, 0), (self.qtgui_time_sink_x_0, 0))
self.connect((self.adsb_framer_1, 0), (self.adsb_demod_0, 0))
self.connect((self.analog_const_source_x_0, 0), (self.qtgui_time_sink_x_0, 1))
self.connect((self.blocks_complex_to_mag_squared_0, 0), (self.adsb_framer_1, 0))
self.connect((self.iio_pluto_source_0, 0), (self.blocks_complex_to_mag_squared_0, 0))
```

V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé kroky zpracování od příjmu signálu po samotnou prezentaci dekodovaných informací společně s navrženými funkcemi filtrace, zobrazení grafu barometrické výšky jednotlivých cílů a záznam do textového souboru.

3.4.1 Vstupní parametry SDR

V první fázi každého bloku jako je demodulace a dekodování jsou nakonfigurovány parametry SDR pro správné a konzistentní zpracování signálu napříč všemi částmi kódu. V tabulce č. níže jsou uvedeny použité parametry pro příjem DF a UF.

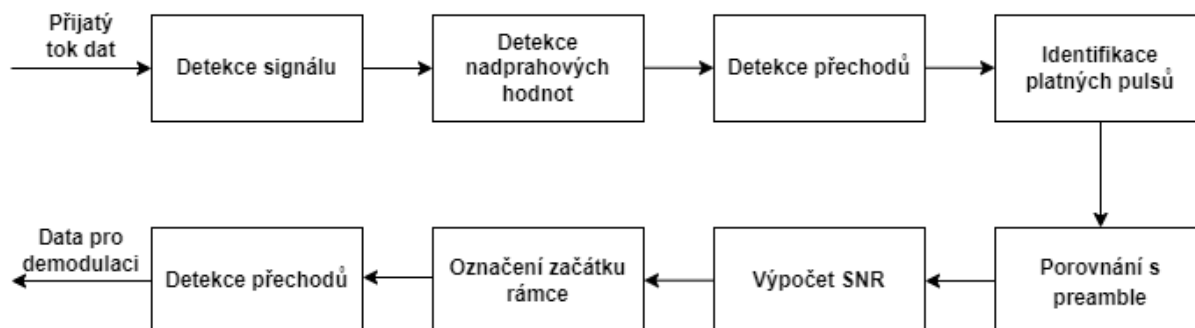
Tabulka 12 - Konfigurace SDR

Nastavitelný parametr	DF 1090 MHz	UF 1030 MHz
Frekvence	1090 MHz	1030 MHz
Vzorkovací frekvence	2 Msps	2 Mb
Zisk	50 dB	50 dB
Řízení zisku	Slow attack (AGC)	Slow attack (AGC)
Filtr	Auto	Auto
Vyrovnávací paměť	204800 vzorků	204800 vzorků
Rozsah frekvenčního pásma	20 MHz	20 MHz

Pro zachycení odpovídajících signálů je zapotřebí pro DF nastavit frekvenci 1090 MHz a pro UF 1030 MHz. Takovým hodnotám bude odpovídat i vhodná vzorkovací frekvence 2 Msps a zisku 50 dB pro použité SDR. Mezi ostatní nastavitelné parametry patří řízení zisku, pro které je nastaveno automatické řízení zisku (AGC). Dále je zde volba filtru, která je přednastavena na automatický výběr dle zvolené frekvence. V poslední řadě lze konfigurovat velikost vyrovnávací paměti (jejíž velikost má vliv na latenci zpracování) a frekvenční rozsah, který nastavuje pásmovou propust kolem centrální frekvence.

3.4.2 Předzpracování signálu

Obrázek č. 31 popisuje řetěz předzpracování signálu v chronologickém sledu kroků.



Obrázek 31 - Blok předzpracování signálu

Po spuštění programu začne SDR zaznamenávat IQ data (viz. kapitola 1.7.1 IQ data), která jednotlivé vzorky přepočítá na magnitudy čtverce podle vztahu č. (1.4).

$$\text{Vzorek signálu} = I^2 + Q^2 \quad (1.4)$$

Tento krok přepočítá komplexní tvar signálu na reálné hodnoty reprezentující sílu signálu v každém vzorku.

```

in0_pulses = np.zeros(N+1, dtype=int)
in0_pulses[np.insert(in0[0:N], 0, self.prev_in0) >= self.threshold] = 1
self.prev_in0 = in0[N-1]

```

Takto převedený signál je porovnán vzorek po vzorku s referenční prahovou hodnotou, která stanoví, zda je signál dostatečně velký (signál nad prahem) a mohl být považován za validní rámec obsahující zprávu.

```

in0_transitions = in0_pulses[1:] - in0_pulses[:-1]
in0_rise_edge_idx = np.nonzero(in0_transitions == 1)[0]
in0_fall_edge_idx = np.nonzero(in0_transitions == -1)[0]

```

V dalším kroku jsou v rámci detekovány sestupné a náběžné hrany a dojde k výpočtu středů těchto pulzů, což zajistí, že každá detekovaná pulzní sekvence bude správně identifikována.

```

for pulse_idx in pulse_idx:
    if pulse_idx > self.prev_eob_idx:
        self.prev_eob_idx = -1
        if False:
            self.add_item_tag(
                0,
                (self.nitems_written(0) - (self.N_hist-1)) + pulse_idx,
                pmt.to_pmt("pulse"),
                pmt.to_pmt("1"),
                pmt.to_pmt("framer")
            )
        amps = in0[pulse_idx:pulse_idx + NUM_PREAMBLE_BITS*self.sps:self.sps // 2]
        pulses = np.zeros(NUM_PREAMBLE_PULSES, dtype=int)
        pulses[amps > in0[pulse_idx]/2] = 1
        corr_matches = np.sum(pulses == self.preamble_pulses)

```

Každá identifikovaná zpráva je porovnána se vzorcem preamble, která identifikuje Mode S zprávy. Dalším krokem po nalezení Mode S zprávy je výpočet poměru signál-šum a označení začátku rámce.

```

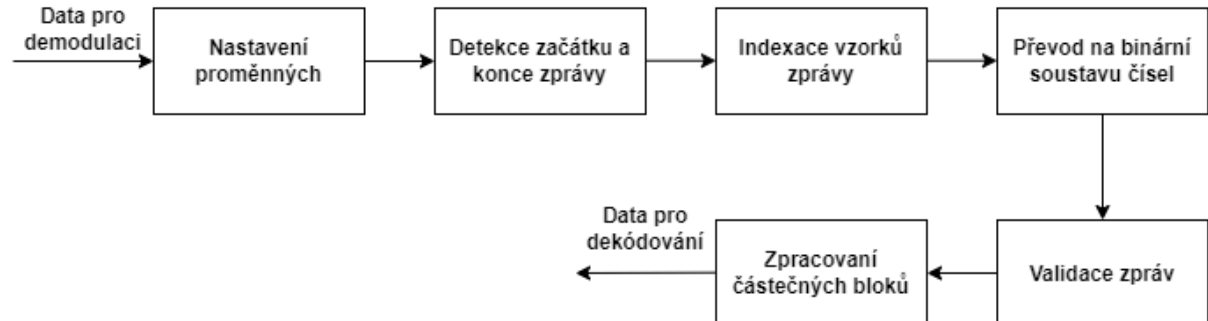
if pulse_idx < NUM_NOISE_SAMPLES:
    snr = 10.0*np.log10(in0[pulse_idx]/np.median(in0[0:pulse_idx])) + 1.6
else:
    snr = 10.0*np.log10(in0[pulse_idx]/np.median(in0[(pulse_idx - NUM_NOISE_SAMPLES):pulse_idx])) + 1.6

```

Výstupem této části kódu je extrahovaná zpráva z přijatého toku dat, která je připravena pro následnou demodulaci a dekodování.

3.4.3 Demodulace zpráv

Na obrázku č. 32 je popsána demodulace v jednotlivých krocích



Obrázek 32 - Blok demodulace zpráv

Prvním krokem bloku pro demodulaci zpráv je správné nastavení vstupních proměnných jako je vzorkovací frekvence a rychlost symbolů v závislosti na vlastnostech Mode S zpráv a použitého SDR.

```
for tag in tags:
    value = pmt.to_python(tag.value)
    snr = value[1] # SNR in power dBs
    sob_offset = tag.offset + (8)*self.sps # Start of burst index (middle of the "bit 1 pulse")
    eob_offset = tag.offset + (8+112-1)*self.sps + self.sps/2 # End of burst index (middle of the "bit 0 pulse")

    # Find the SOB and EOB indices in this block of samples
    sob_idx = sob_offset - self.nitems_written(0)
    eob_idx = eob_offset - self.nitems_written(0)
```

Do hlavní smyčky vstupují jednotlivé rámce zpráv, u kterých jsou detekovány začátky a konce zprávy, jelikož se můžeme setkat s dvěma délkami zpráv.

```
if eob_idx < len(input_items[0]):

    bit1_idx = range(sob_idx, sob_idx + self.sps*MAX_NUM_BITS, self.sps)
    bit1_amps = in0[bit1_idx]

    bit0_idx = range(sob_idx + self.sps // 2, sob_idx + self.sps // 2 + self.sps*MAX_NUM_BITS, self.sps)
    bit0_amps = in0[bit0_idx]

    self.bits = np.zeros(MAX_NUM_BITS, dtype=np.uint8)
    self.bits[bit1_amps > bit0_amps] = 1

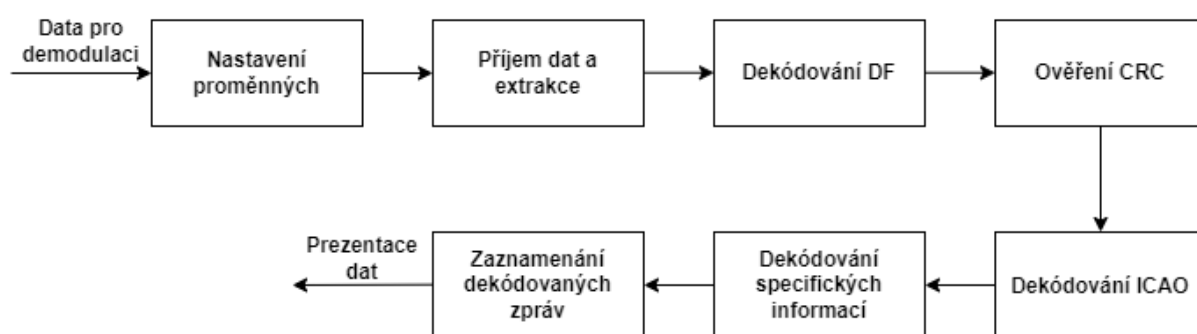
    self.bit_confidence = 10.0*np.log10(bit1_amps/bit0_amps)

    # Send PDU message to decoder
    meta = pmt.to_pmt({
        "timestamp": self.start_timestamp + tag.offset/self.fs,
        "snr": snr,
    })
    vector = pmt.to_pmt(self.bits)
    pdu = pmt.cons(meta, vector)
    self.message_port_pub(pmt.to_pmt("demodulated"), pdu)
```

Dalším krokem demodulace je výpočet indexů pro jednotlivé bity a stanovení jejich amplitudy, což je zapotřebí pro převod do binární soustavy. Jakmile dojde k demodulaci, je tato zpráva přiřazena k časovému údaji přijetí zprávy a vypočtenému SNR. Demodulované zprávy jsou poté odeslány do dalšího bloku zajišťující samotné dekódování zprávy. Nicméně po samotné validaci zpráv může docházet k situaci, kdy data jedné zprávy zasahují do dalšího bloku vzorků, proto je zapotřebí zpracovat jeho část a zbytek v dalším cyklu hlavní smyčky tohoto bloku.

3.4.4 Dekódování odpovědí v módu S

Na obrázku č. 33 jsou shrnuty jednotlivé dílčí kroky dekódování Mode S zpráv.



Obrázek 33 - Blok dekódování odpovědí v módu S

Obdobně jako u demodulace zpráv je zapotřebí, aby blok zajišťující dekódování Mode S odpovědí (DF) načel nezbytné vstupní parametry, jako je například textový seznam všech dekódovaných typů zpráv. Demodulovaná data včetně časové značky a údaji o SNR vstupují do dekodéru hlavičky zprávy, která dokáže klasifikovat druh Mode S zprávy, jejichž struktura je popsána v kapitolách 1.5 Mode S a 1.6 ADS-B.

```

def decode_header(self):
    self.df = self.bin2dec(self.bits[0:0+5])

    if self.msg_filter == "All Messages" or (self.msg_filter == "Extended Squitter Only" and self.df in [17,18,19]):
        logging.info("-----")
        self.log("info", "Datetime", self.datetime)
        self.log("info", "SNR", "{:1.2f} dB".format(self.snr))
        self.log("info", "Downlink Format (DF)", self.df, DF_STR_LUT[self.df])
  
```

Dekódováním hlavičky dochází k identifikaci zprávy, která je programem zpracována na základě výše zmíněných struktur jednotlivých DF. K tomuto dekódování dochází v rámci dekódování celého paketu dat.

```

def decode_packet(self, pdu):
    self.reset()

    meta = pmt.to_python(pmt.car(pdu))
    vector = pmt.to_python(pmt.cdr(pdu))
    self.timestamp = meta["timestamp"]
    self.datetime = datetime.datetime.utcfromtimestamp(self.timestamp).strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S.%f UTC")
    self.snr = meta["snr"]
    self.bits = vector

    # Decode the header
    self.decode_header()

    parity_passed = self.check_parity()

    if parity_passed == 0:
        parity_passed = self.correct_errors()

    if parity_passed == 1:
        self.decode_header()
        # If parity check passes, then decode the message contents
        self.decode_message()

    if self.print_level == "Brief":
        self.print_planes()

```

Součástí dekódování paketu dat je nejprve zapotřebí ověřit paritu jednotlivých zpráv. Dále se vypočítá CRC a porovná se s kontrolním součtem zprávy. Pokud je parita stejná, zpráva je považována za validní.

```

def check_parity(self):

    if self.msg_filter == "All Messages":
        if self.df in [0,4,5]:
            self.payload_length = 56
            ap_bits = self.bits[32:32+24]
            crc_bits = self.compute_crc(self.bits[0:self.payload_length-24], self.crc_poly)
            crc = self.bin2dec(crc_bits)
            self.aa_bits = crc_bits ^ ap_bits
            self.aa = self.bin2dec(self.aa_bits)
            self.aa_str = "{:06x}".format(self.aa)
            parity_passed = self.aa_str in self.plane_dict

```

Integrita zprávy, která je kontrolována pomocí CRC (kontrola součtu), se v případě detekce chyby pokusí o její opravu. Z ověřené zprávy je dekódována identifikační část informace (ICAO adresa). Příklad dekódování zprávy (All-Call odpověď DF11) je znázorněn na další části kódu.

```

def decode_message(self):

    elif self.df == 11:
        # Capability, 3 bits
        ca = self.bin2dec(self.bits[5:5+3])

        # Address Announced (ICAO Address) 24 bits
        self.aa_bits = self.bits[8:8+24]
        self.aa = self.bin2dec(self.aa_bits)
        self.aa_str = "{:06x}".format(self.aa)

        # Update planes dictionary
        self.update_plane(self.aa_str)

        self.log("info", "Capability (CA)", ca, CA_STR_LUT[ca])
        self.log("info", "Address Announced (AA)", self.aa_str)
        self.log("info", "Callsign", self.plane_dict.get(self.aa_str, {}).get("callsign", ""))

```

Nejkomplexnější částí dekodování je samotné volání příslušných funkcí na základě klasifikovaného DF, které z jednotlivých zpráv dekodují informaci, jako je například barometrická výška letadla, GNSS pozice a další. Posledním krokem bloku dekodování zpráv je samotné generování dat pro grafické zobrazení v terminálovém okně.

3.4.5 Dekodování dotazů v módu S

Obdobně jako při dekodování odpovědí Mode S zpráv pracuje i blok pro dekodování dotazů. Rozdíl je v odlišné klasifikaci dat (dle pravidel viz. Kapitoly 1.5.1 a 1.5.3). Pro zahájení příjmu a dekodování těchto zpráv je zapotřebí spouštět program souborem „DP_ModeS_UF.py“, který obsahuje odlišnou konfiguraci SDR viz. Tabulka č. 12. Tento soubor se zároveň odkazuje na odlišné podprogramy „demod_tx“ a „decoder_tx“. Řetězec zpracování je téměř totožný s řetězcem pro dekodování odpovědí v módu S viz obrázek č. 33.

```

def decode_packet(self, bits):
    self.reset()
    self.uf = self.bin2dec(bits[0:5]) # UF is 1-5 bits

    if self.uf == 11: # All-Call
        self.timestamp = int(time.time())
        self.decode_all_call(bits)

```

Na základě dekodovaných prvních pěti bitů paketu program volá příslušné části kódu zajišťující dekodování odlišných struktur dotazů v módu S.

```

def decode_all_call(self, bits):
    ap_bits = bits[32:56]
    ap = "{:06x}".format(self.bin2dec(ap_bits))

    if self.uf in self.uf_dict:
        self.uf_dict[self.uf]["msg_count"] += 1
    else:
        self.uf_dict[self.uf] = {"msg_count": 1}

    self.log("AP", ap)

```

Úspěšně dekodované zprávy jsou po validaci prezentovány v terminálu s odlišnou hlavičkou viz. obrázek č. 53 v kapitole 4.4 Ověření dotazů v módu S.

3.4.6 Filtrace zpráv

Funkce zajišťující filtraci podle ICAO adresy a callsignu je implementována ve vedlejší části kódu v modulu „decoder.py“ před samotným výstupem zpráv do terminálu.

```

def print_planes(self):
    index = 0
    for icao in self.plane_dict:
        plane_info = self.plane_dict[icao]
        if not self.check_filter(plane_info):
            continue

```

Funkce výběru filtrace uživatelem čte všechny výstupní zprávy a zprávy odpovídající nastavené filtraci průběžně ukládá do textového souboru „ModeS_Filtered_Record.txt“. Zaznamenané odfiltrované zprávy vypisuje do nového terminálového okna.

```

def log_filtered_plane(self, plane_info):
    with open("ModeS_Filtered_Record.txt", "a") as f:
        f.write(f"{plane_info['datetime']} {plane_info['icao']} {plane_info['callsign']} {plane_info['altitude']} "
                f"{plane_info['vertical_rate']} {plane_info['speed']} {plane_info['heading']} "
                f"{plane_info['latitude']} {plane_info['longitude']}\n")

```

3.4.7 Grafické zobrazení výšky letadla

Informace o barometrické výšce cíle je dekodována z DF4, DF20, a v poslední řadě DF 17 (DF17 může obsahovat i geometrickou výšku). Grafické zobrazení umožňuje uživateli sledovat průběh výšky specifického cíle v čase.

```

def plot_filtered_data(self):
    if not os.path.isfile("ModeS_Filtered_Record.txt"):
        print("File ModeS_Filtered_Record.txt does not exist.")
        return

    times = []
    altitudes = []

    with open("ModeS_Filtered_Record.txt", "r") as file:
        for line in file:
            parts = line.split()
            if len(parts) < 5:
                continue
            time_str = parts[0]
            altitude = float(parts[4])

            # Convert time string to datetime object
            time_obj = datetime.strptime(time_str, "%H:%M:%S")

            times.append(time_obj)
            altitudes.append(altitude)

plt.figure(figsize=(10, 5))

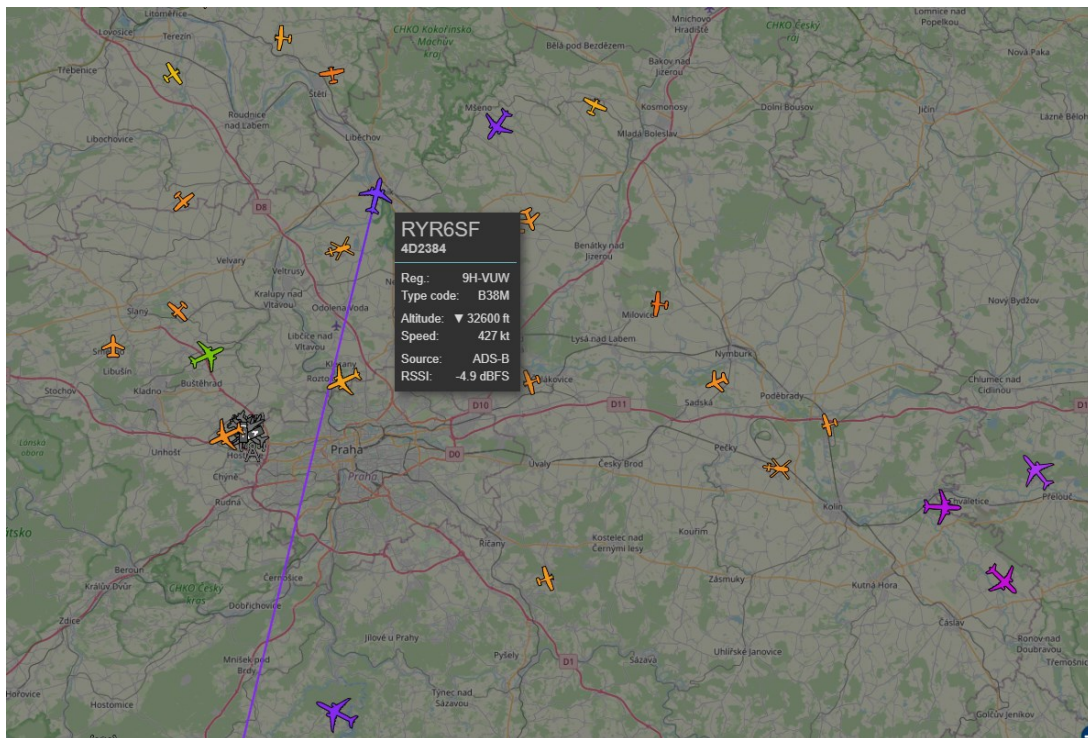
```

Navržená funkce je podmíněná výběrem (filtrací) cíle podle callsign nebo ICAO adresy, která sbírá informace z přijatých zpráv. Na obrázku č. 34 je zobrazeno zachycení ADS-B zpráv letadla Boeing 737 s ICAO adresou 4D2384, které přelétalo nad Prahou a postupně snižovalo svou výšku

Time	ICAO	Callsign	Alt	Climb	Speed	Hdng	Latitude	Longitude	M
			ft	ft/m	kt	deg	deg	deg	
16:55:42	48455f	KLM875	31000	0	508	-44	49.8152704	15.6823153	29
16:55:42	4bb873	PGT6MH	37025	-64	441	-41	49.8696899	15.7588484	71
16:55:42	471fa0	WZZ404	38000	0	472	-2	50.0260162	15.4861691	88
16:55:42	4bb026		39000	0	469	-44	49.9054886	15.5507021	55
16:55:42	4bb1c4	THY81D	36000	0	478	129	50.0420380	15.5576525	27
16:55:42	4d2384		33975	-320	454	76	50.1980694	14.4107963	8
16:55:42	4070ec	EXS63WY	37000	0	441	-45	49.7546594	15.6410423	29
16:55:42	4bb86d	PGT96TP	34975	0	450	-39	49.6728058	15.6040553	14

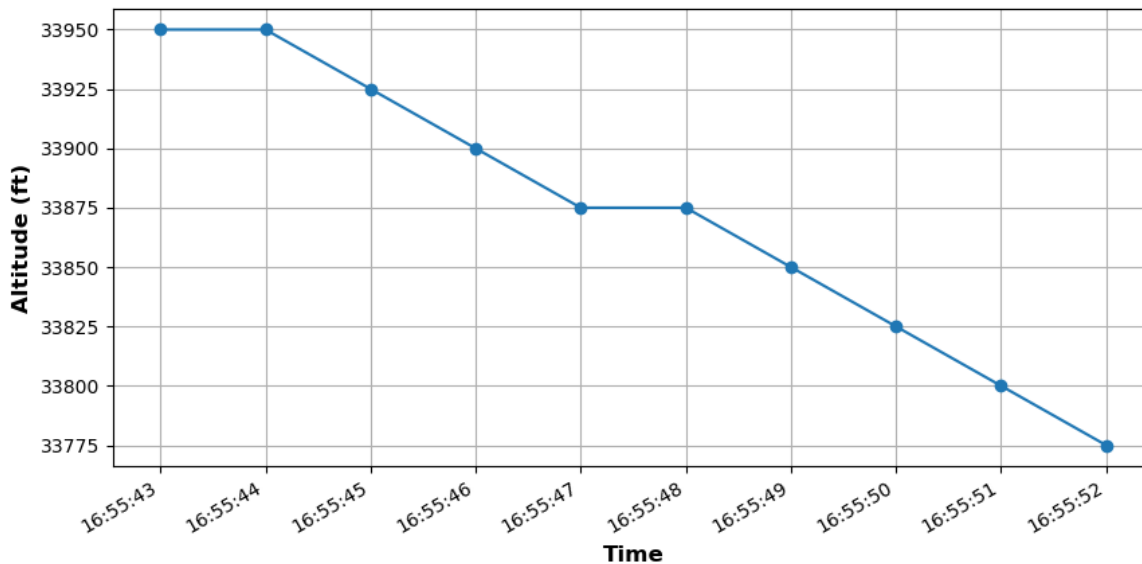
Obrázek 34 - Zaznamenaný cíl 4D2384

Na dalším obrázku č. 35 je graficky zobrazen totožný cíl jako reference z internetové stránky ADS-B Exchange.



Obrázek 35 - Cíl 4D2384 z referenčního zdroje

Graf časového průběhu výšky tohoto letadla je na obrázku č. 36.



Obrázek 36 - Barometrická výška 4D2384

3.4.8 Záznam zpráv

Vedlejší část programu zajišťující dekodování signálu zároveň vytváří záznam všech zpráv, které jsou publikovatelné a připravené pro výpis do hlavního terminálového okna. Funkce pracuje s textovým souborem s názvem „ModeS_Record.txt“. Tato funkce nejprve ověří, zda soubor již existuje; pokud ne, vytvoří ho a zapíše hlavičku s popisky. Následně pro každou zprávu, která je zobrazena v terminálu, zaznamená údaje na nový řádek. V souboru

zachová formát podobný formátu vypisovaného v terminálu. Tímto způsobem se vytváří konzistentní záznam všech přijatých zpráv, což umožňuje jejich pozdější analýzu nebo archivaci.

```
def log_plane_info(self, plane_info):
    file_exists = os.path.isfile("ModeS_Record.txt")
    with open("ModeS_Record.txt", "a") as f:
        if not file_exists:
            # Write header if the file is being created
            f.write("Time\tICAO\tCallsign\tAlt\tClimb\tSpeed\tHdng\tLatitude\tLongitude\n")
        f.write(f"{plane_info['datetime']}\t\t{plane_info['icao']}\t\t{plane_info['callsign']}\t\t"
              f"{plane_info['altitude']}\t\t{plane_info['vertical_rate']}\t\t"
              f"{plane_info['speed']}\t\t{plane_info['heading']}\t\t"
              f"{plane_info['latitude']}\t\t{plane_info['longitude']}\n")
```

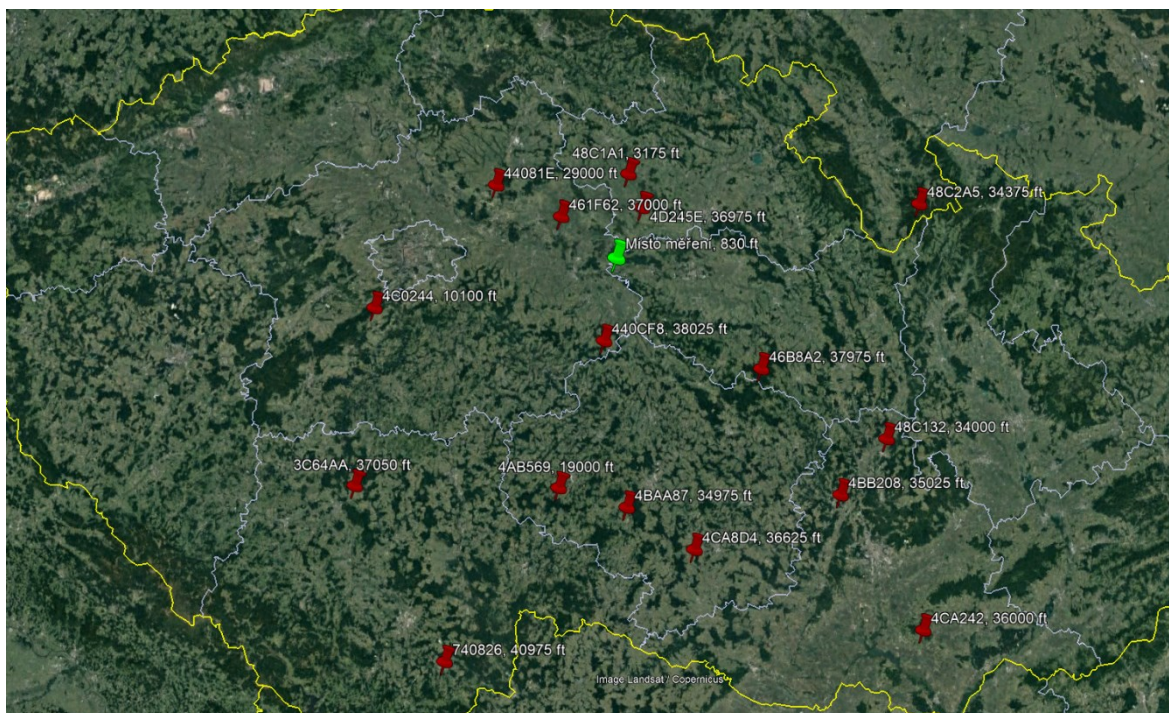
Time	ICAO	Callsign	Alt	Climb	Speed	Hdng	Latitude	Longitude
11:17:14	4984A5	GAST27	11925	-192	91	75	49.9281921	15.7992072
11:17:16	4984A5	GAST27	11925	-256	91	82	49.9290161	15.7992795
11:17:16	4984A5	GAST27	11900	-256	89	90	49.9290161	15.7992795
11:17:18	4984A5	GAST27	11900	-128	89	90	49.9302979	15.7991349
11:17:19	4984A5	GAST27	11900	0	86	100	49.9302979	15.7991349

Obrázek 37 - Ukázka uloženého záznamu v textovém souboru

4 Ověření funkčnosti

4.1 Ověření funkčnosti dekodovaných zpráv mód S

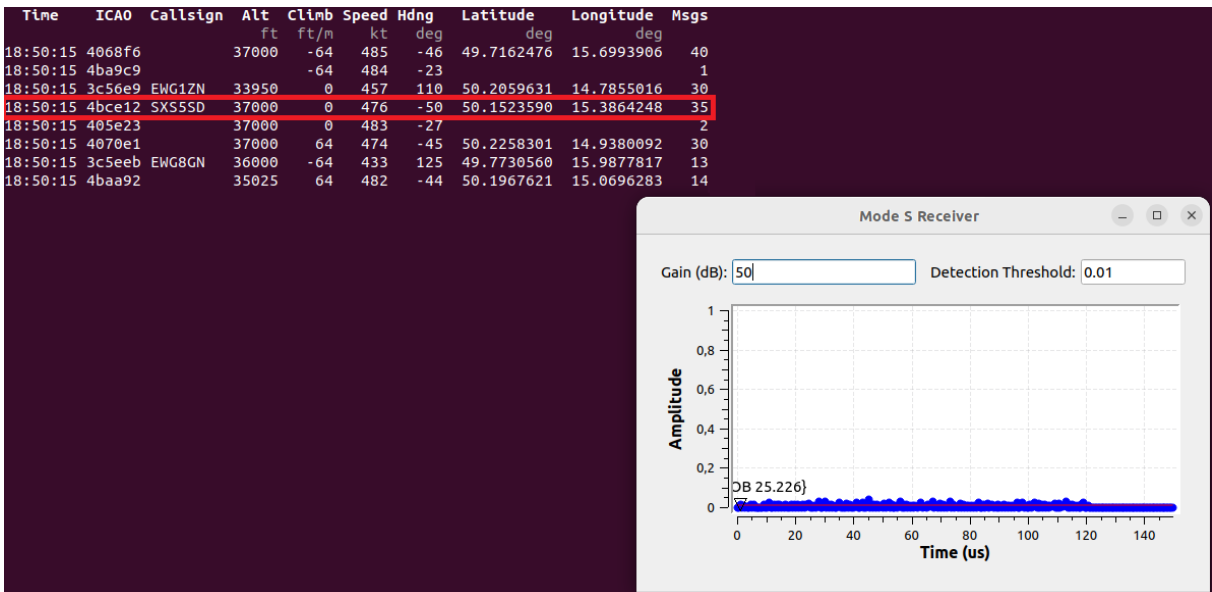
V rámci testování a vývoje softwarové části práce bylo nutné vybrat vhodnou referenci, která umožní porovnání výstupních dat navrženého systému s výstupními daty této reference. Zvolená reference zároveň poskytuje přehled dekodovaných zpráv v oblasti pokrytí na mapovém podkladu. Na obrázku č. 38 jsou znázorněny poslední zaznamenané polohové zprávy jedinečných cílů v rámci minutového měření navrženého systému.



Obrázek 38 - Polohové zprávy na mapovém podkladu

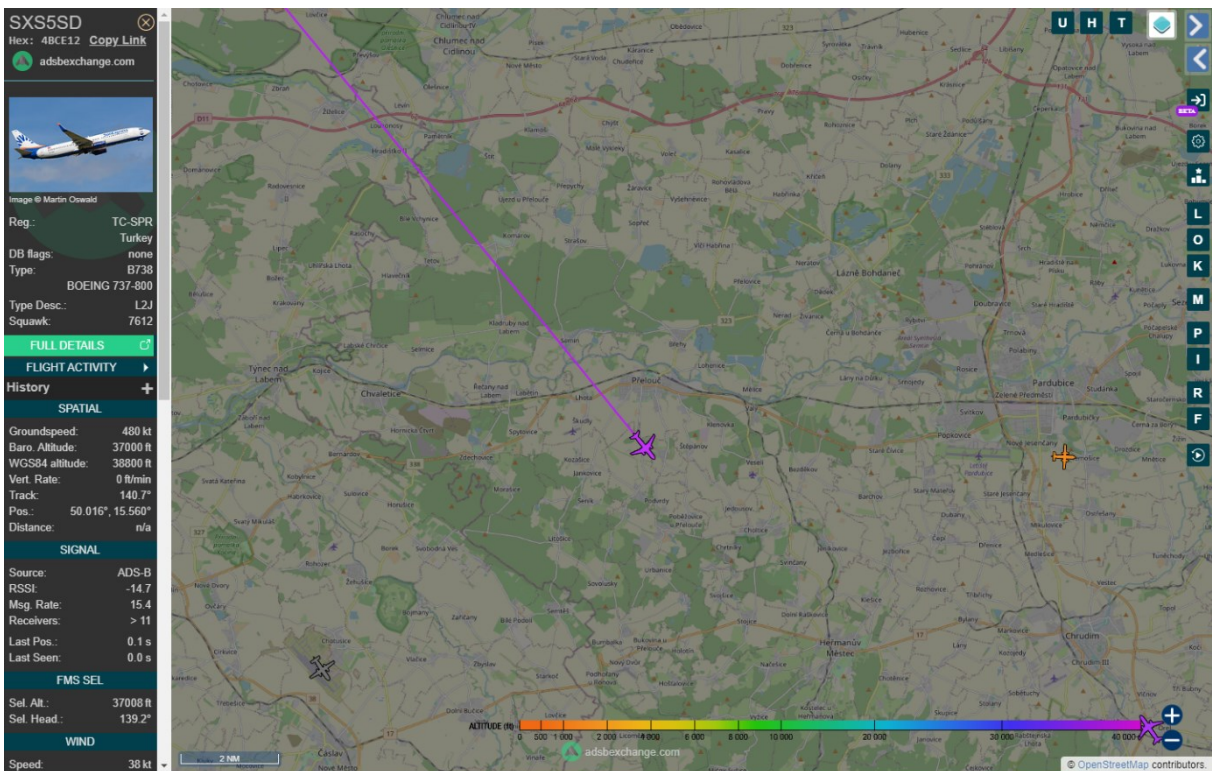
4.1.1 Porovnání s referencí ADS-B Exchange

Pro účely testování a ověření funkčnosti navrženého programu bylo zvoleno ověření vůči referenční platformě ADS-B Exchange pro sdílení a sledování letového provozu v reálném čase. ADS-B Exchange shromažďuje data od tisíců dobrovolníků po celém světě, kteří sdílí informace o letadlech prostřednictvím svých SDR přijímačů, čímž vytváří detailní a otevřený přehled o globálním letovém provozu. Během ověřování byla porovnávána data přijímaná navrženým zařízením s daty dostupnými na této platformě, aby byla zjištěna shoda a spolehlivost informací. Na obrázku č. 39 níže je zobrazen záznam cíle s ICAO adresou 4BCE12, zaznamenané informace byly porovnávány s informacemi dostupnými z platformy ADS-B Exchange. Obsah zpráv byl shodný s referencí, přičemž údaje získané z navrženého systému jsou zpracovány rychleji. Důsledkem může být latence nahrávání dat na web od přispěvatelů.



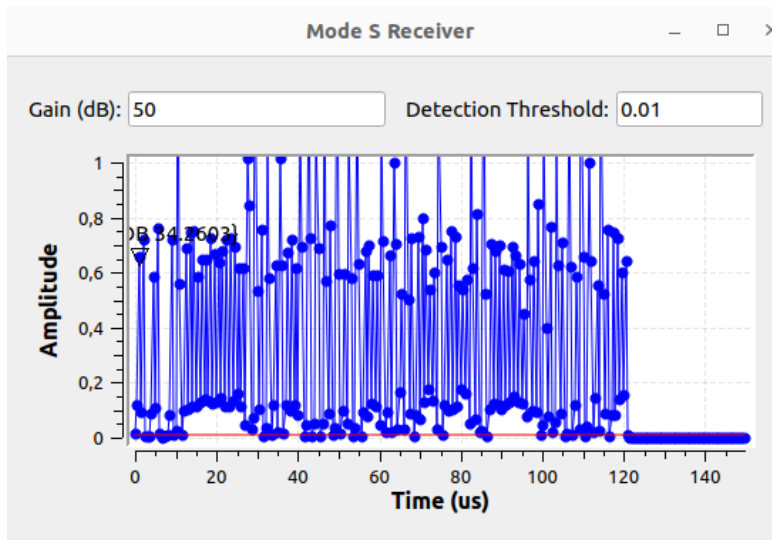
Obrázek 39 - Zaznamenaný cíl 4BCE12

Na obrázku č. 40 níže je zobrazen sledovaný cíl s informacemi poskytnutými z platformy ADSB-Exchange. Během ověřování byly kontrolovány a porovnávány údaje zobrazené v tabulce vlevo.



Obrázek 40 - Porovnání cíle 4BCE12 s referenčním zdrojem

Díky rozsáhlé síti přijímačů je na ADS-B Exchange možné sledovat letové cíle i v oblastech, které jsou mimo dosah navrženého systému, který má jednak omezený dosah a jednak omezenou viditelnost, například kvůli terénním překážkám. Na obrázku č. 41 je detailní záznam zachycení zprávy v módu S.



Obrázek 41 - Ukázka přijaté zprávy v módu S

4.1.2 Polohové zprávy z navrženého systému

Mezi důležité vlastnosti sekundárních přehledových systémů se mimo správné dekodování zpráv řadí i schopnost dokázat průběžně v reálném čase detekovat aktualizované zprávy od všech cílů. Na obrázku č. 42 jsou zobrazeny jednotlivé polohové zprávy, které byly zaznamenány navrženým systémem. Měření bylo prováděno na pozorovacím místě Ďolíček u pardubického letiště. Pro účely ověření byl vybrán jako náhodný cíl vojenský vrtulník s ICAO adresou 4984A5, který se po dobu záznamu pohyboval ve výšce 11900-12000 ft.



Obrázek 42 - Měřící pracoviště: Pardubické letiště



Obrázek 43 - Polohová data cíle 4984A5

Navržený systém dokázal v této letové hladině přijímat a dekódovat data cíle téměř každou vteřinu. Na obrázku lze vidět, že docházelo k validaci zpráv, které neobsahují aktualizovanou polohovou informaci, což může být způsobeno například garblingem, což je jev, kdy se na vstup přijímače dostanou dvě navzájem překrývající se zprávy. Tento jev by mohl být omezen využitím vhodné antény s více svazky (potlačení postranních laloků), nebo zakomponováním složitějších analytických metod. Další příčinou může být nevhodné umístění přijímací antény, která byla ve výšce 1 metr nad zemí, což popisuje kapitola 4.2 Výkonnost systému v odlišných podmínkách příjmu signálu. Bylo ověřeno, že navržený systém dokáže přijímat a dekódovat zprávy specifického cíle v reálném čase.

4.1.3 Polohové zprávy multilaterančního systému společnosti ERA a.s.

V rámci relevantního ověření funkcionality a spolehlivosti navrženého systému bylo provedeno srovnání naměřených dat s daty multilaterančního systému. Obdobným postupem jako při analýze záznamu dat z navrženého systému byla provedena analýza dat systému ERA zakódovaná do standardizovaného výstupního formátu ASTERIX kategorie 21 obsahující ADS-B informace cílů. Systém ERA se skládá z velkého množství přijímacích stanic a antén na strategických místech. Data ze všech stanic jsou směřována do centrální procesorové stanice, která poskytuje několik výstupních kanálů jako je například ASTERIX kategorie 20, tedy zpracovaná data na principu multilaterace anebo již zmíněný ASTERIX kategorie 21.



Obrázek 44 - Porovnání polohových dat cíle 4984A5 se systémem ERA

Z analýzy zaznamenaných dat obou systémů (viz. obrázek č. 44) lze vyvodit závěr, že systém ERA dokáže detekovat a dekodovat větší počet zpráv v módu S a zároveň využívá implementovaných funkcí a metodik pro korekci výstupních dat. Porovnání stejných polohových zpráv obou systémů vykazuje rozdílné časové značky dat, jelikož navržený systém nevyužívá žádné metodiky pro zajištění časové synchronizace jako je například čas z GNSS systémů. Bylo ověřeno, že obsah polohových zpráv dekodovaných navrženým systémem se shoduje s obsahem zpráv reference. Zároveň z obrázku č. 44 vyplývá, že systém dokáže i za nepříznivých podmínek přijímat a vést záznam o cíli pro následnou rekonstrukci vedení cíle na mapovém podkladu.

4.2 Výkonnost systému v odlišných podmínkách příjmu signálu

V následujících dvou podkapitolách je popsána metoda pro stanovení výkonnosti navrženého systému s využitím dat dvou cílů s téměř stejnou barometrickou výškou. Měření byla prováděna na dvou místech s odlišnými podmínkami.

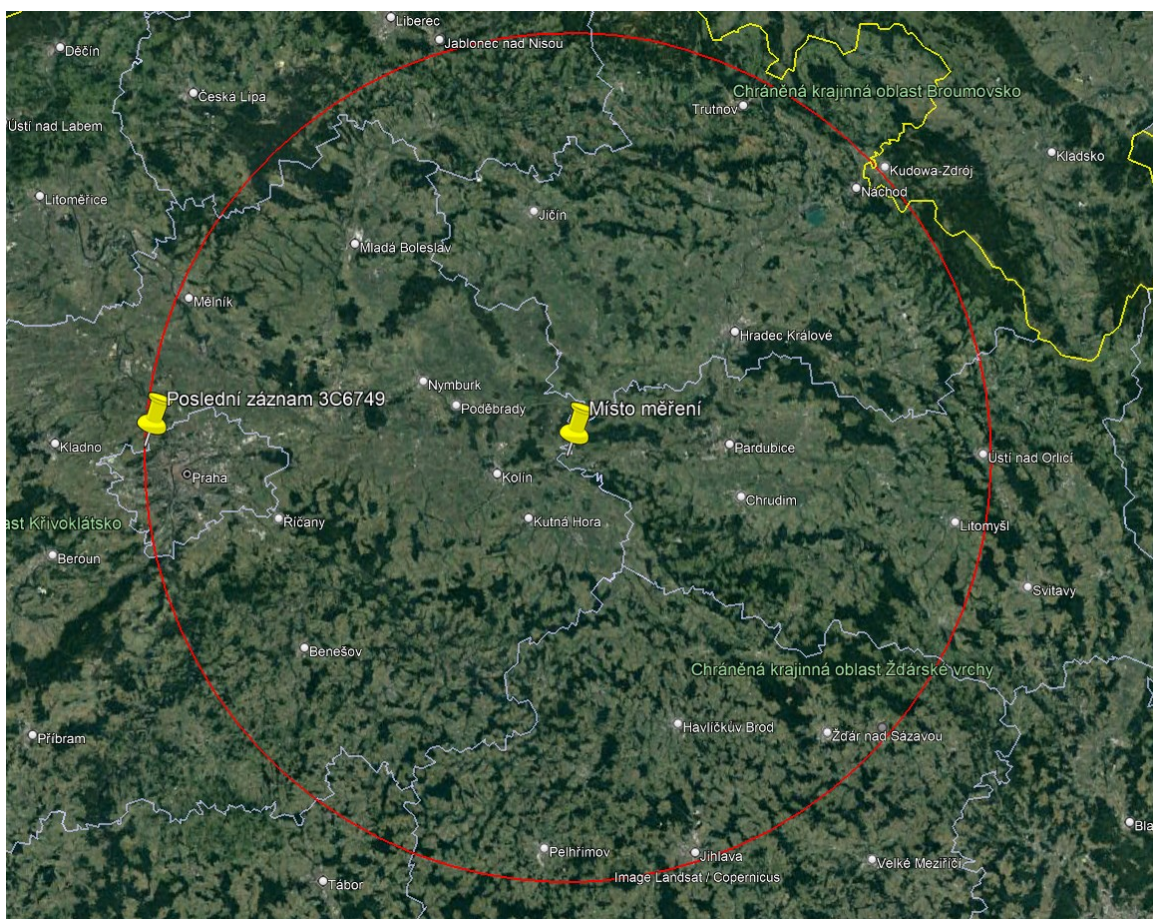
4.2.1 Výkonnost systému s anténou ve výšce 217 m AMSL

Stanovení výkonnosti systému je závislé na mnoha faktorech jako je například vysílací výkon transpondéru na palubách letadla a zároveň šikmá vzdálenost od cíle k navrženému systému. V této kapitole bude popsán dosah systému, který je závislý na specifickém cíli. Na obrázku č. 45 je zobrazen záznam z navrženého systému. Během ověření dosahu systému byl sledován cíl s ICAO adresou 3C6749, které přelétalo nad Prahou směrem na západ.

Time	ICAO	Callsign	Alt ft	Climb ft/m	Speed kt	Hdng deg	Latitude deg	Longitude deg	Msgs
11:28:46	3c6749	DLH5RE	36025	0	440	176	50.1236115	14.3502406	50
11:28:46	06a2e0			0	472	21			3
11:28:46	504e72	FIA618	37000	0	446	-26	49.9439873	16.2014193	20
11:28:46	781418	CSH870	33975	-64	496	120	50.0617645	15.1759792	81
11:28:46	4bc8c1		33975	0	462	139			2

Obrázek 45 - Záznam dat s anténou ve výšce 217 m AMSL (cíl 3C6749)

Sledovaný cíl se pohyboval v letové hladině mezi 36000 ft a 37000 ft v dosahu systému. Poslední zaznamenaná zpráva byla přijata se souřadnicemi uvedenými na obrázku výše. Tyto koordináty jsou vyznačeny na obrázku č. 46 níže společně s místem měření. Výsledný dosah činí necelých 75 km.



Obrázek 46 - Výkonnost systému s anténou ve výšce 217 m AMSL (cíl 3C6749)

Na základě těchto informací byla zakreslena kružnice představující všesměrový příjem signálu vzhledem k charakteristice použité antény. Dosah bude všesměrový, pokud budou podmínky pro šíření signálu zahrnující ztráty ve všech bodech ze všech směrů stejné v letové hladině, na které se nacházelo sledované letadlo. Dosah systému bude nižší pro sledované cíle, které se budou nacházet v nižších letových hladinách, nebo cíle používající nižší vysílací výkon transpondéru.

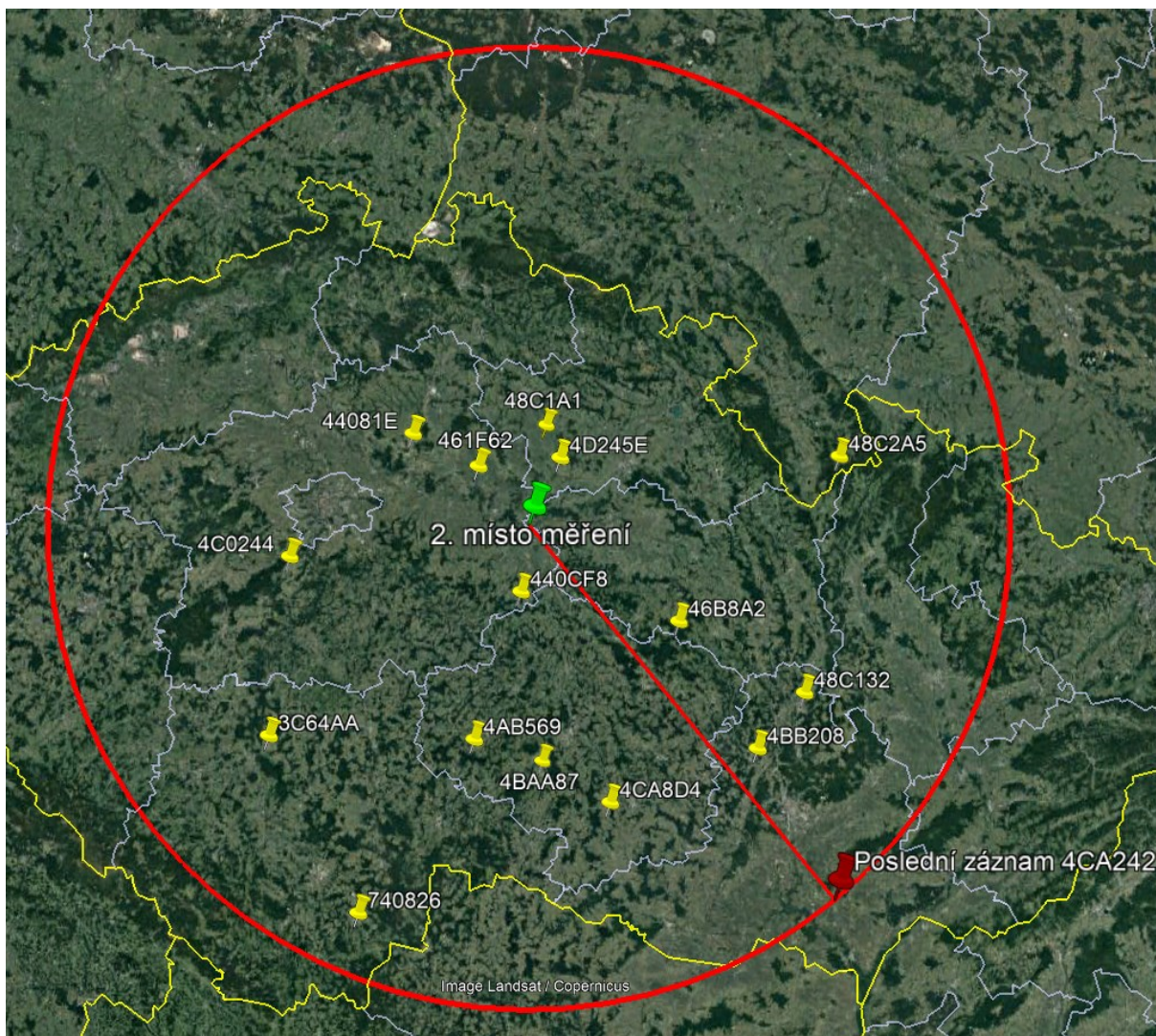
4.2.2 Výkonnost systému s anténou ve výšce 253 m AMSL

V rámci ověření dosahu systému pro mód S zprávy byla nasimulována situace pro optimalizaci podmínek příjmu signálu tím, že se měřicí stanoviště přemístilo na vyšší bod (2 kilometry od původního místa měření). V praxi se antény kvůli zajištění rádiové i optické viditelnosti umísťují na vysoké objekty, jako jsou například stožáry nebo velké budovy. Měřicí stanoviště bylo během tohoto měření o 36 metrů výše a zároveň změnou místa na otevřené prostranství došlo ke zlepšení podmínek v souvislosti s eliminováním vlivu vícecestného šíření signálu a stíněním blízkými objekty. V případě, kdy je anténa umístěna na stožáru, bývá přijímač často umístěn například v technické místnosti pod stožárem. V takovém případě bývá dosah systému ovlivněn útlumem kabelové trasy mezi anténou a přijímačem, což mohlo být pro toto měření zanedbáno s ohledem na návrh systému a optimální podmínky testování. Na obrázku č. 47 je znázorněn záznam z měření se sledovaným cílem, který se nacházel nejdál od měřeného místa. Cíl s ICAO adresou 4CA242 a barometrickou výškou 36000 ft byl systémem naposledy zaznamenán ve vzdálenosti 160 km.

Time	ICAO	Callsign	Alt		Speed		Hdng		Latitude	Longitude	Msgs
			ft	ft/m	kt	deg	deg	deg			
18:11:01	4caa61		32525	-1856	409	-13					3
18:11:01	48c132		34000	0	433	130	49.4991341	16.6516361			6
18:11:01	4ba8f2			0	444	-18					1
18:11:01	4cafc3		37000	0	440	-44	50.1579895	15.1310650			12
18:11:01	461f62		39000								1
18:11:01	4d2533		19800								1
18:11:01	48ad0b		26325	1472	406	23					5
18:11:01	489222	ENT15PS	38000	0	460	33					5
18:11:01	4d245e	WZZ8DD	36975	64	439	-32	50.1744674	15.5449862			21
18:11:01	440cf8	EJU98TY	38025	64	441	109	49.7870178	15.3422627			10
18:11:01	46b8a2	AEE8DT	37975	0	452	125	49.7108459	16.0680831			11
18:11:01	4b19fd	SWR1375	34000	0	446	-178	50.1741028	15.2668762			12
18:11:01	44081e	AUA2JA	29000	64	424	-51	50.2494631	14.8218928			7
18:11:01	4bb208		35025	0	453	-45	49.3153459	16.4644583			11
18:11:01	50031c		41000	0	439	-43					5
18:11:01	3c6743		36000	0	449	-179	50.2267922	14.5168737			11
18:11:01	48c2a5		34625	1216	452	-179	50.2028643	16.7723372			6
18:11:01	4ab569		19000	0	263	-47	49.3398789	15.1533990			15
18:11:01	471f54	WZZ37	36000	0	466	112	51.4883423	17.0929450			9
18:11:01	4ca242		36000	0	437	-132	48.9218445	16.8059129			11
18:11:01	4ac9ed		39025	64	435	-82	49.6205424	17.5877009			7
18:11:01	4ca8d4	RJR4GB	36600	-960	439	-23	49.1662903	15.7739727			14
18:11:01	4c0244		9625	-1280	268	150	49.8842142	14.2330850			6
18:11:01	740826	RJA112	41000	0	484	-32	48.8032379	14.6835797			9
18:11:01	48ad10	LOT35Y									1
18:11:01	4baa87		35000	0	441	-21	49.2769403	15.5152251			14
18:11:01	471f6d		35950	0	426	-151					4
18:11:01	491d84		41550	-1472	471	126	50.2896881	15.4441030			4
18:11:01	4d2262		38000								1
18:11:01	4ba934		40000								1
18:11:01	48c1a1	RJR5WH	3175				50.1346653	14.3358963			5
18:11:01	484cc2		35050	576	465	133					4
18:11:01	4891b9		36000								1
18:11:01	3c64aa		37050				49.3365326	14.2065195			4
18:11:01	49d2ee		36000								1

Obrázek 47 - Záznam dat s anténou ve výšce 253 m AMSL (cíl 4CA242)

Na obrázku č. 48 je vyznačena výkonnost systému v závislosti na cíli, který měl podobnou barometrickou výšku v případě, kdy byli zlepšeny podmínky pro příjem signálu.



Obrázek 48 - Výkonnost systému s anténou ve výšce 253 m AMSL (cíl 4CA242)

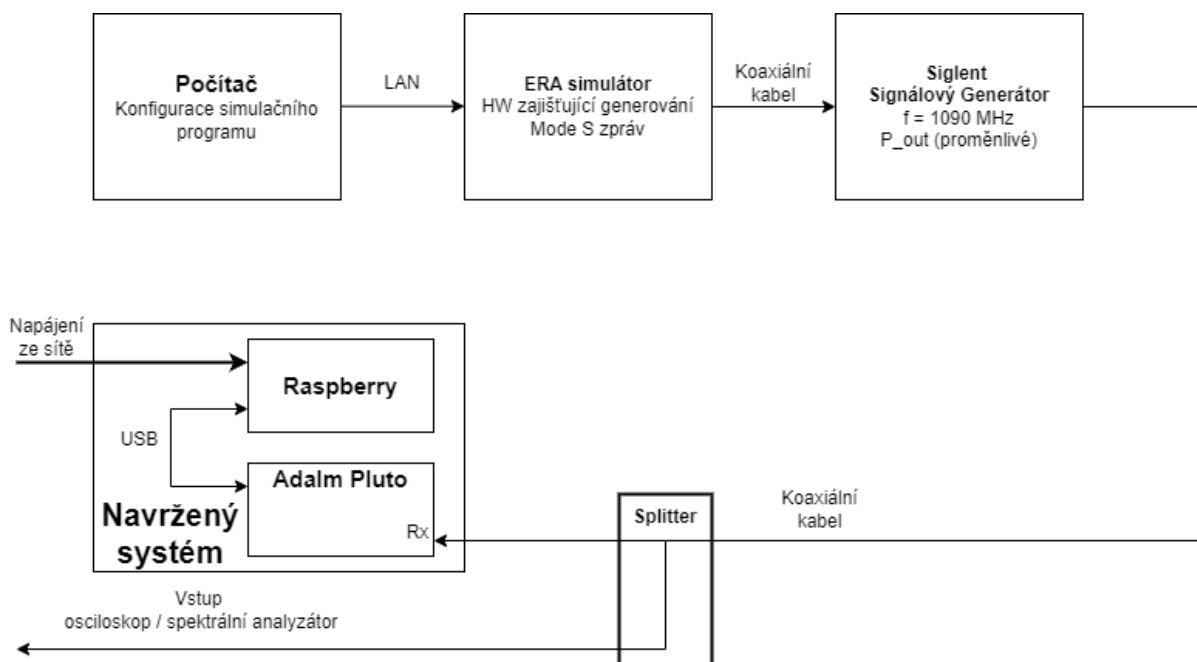
Závěrem tohoto měření je ověření, že pokud je zapotřebí sledovat provoz ve větší oblasti, je nutné zajistit pro přijímací anténu vhodné podmínky. Klíčové je umístění antény co nejvýše, minimalizace překážek v okolí a omezení vlivu rušivých podmínek, jako je například vícecestné šíření signálu. Z příložených obrázků č. 46 a 48 lze vidět, že zlepšením podmínek příjmu se zvětšila výkonnost o 85 km.

4.3 Ověření citlivosti systému

Citlivost přijímače je klíčová veličina, která určuje, jak slabý signál je přijímač schopen detekovat a zpracovat. Jinými slovy, citlivost udává nejnižší úroveň vstupního signálu, při které je přijímač ještě schopen spolehlivě rozlišit signál od šumu. Mezi nejběžnější faktory, které ovlivňují citlivost patří úroveň šumu jednotlivých hardwarových komponentů jako jsou například zesilovače, směšovače, filtry a oscilátory. Dále šířka pásma, která ovlivňuje množství šumu na vstupu přijímače, v neposlední řadě zisk antény a kvalita zpracování signálu (metody použité pro vylepšení citlivosti).

V rámci ověření funkčnosti navrženého zařízení bylo provedeno laboratorní měření za účelem stanovení citlivosti systému. Na obrázku č. 49 je znázorněno zapojení měřícího pracoviště.

V prvním kroku bylo na počítači připojeném k simulátoru potřeba nakonfigurovat jeden ADS-B cíl s ICAO adresou 49E729 a call-sign SQB02ERA. Veškeré tyto informace jsou potom předány simulátoru, který vygeneroval zprávy každou vteřinu. Takto generované zprávy se po koaxiálním kabelu dostávají do signálového generátoru Siglent, který zprávy moduluje na frekvenci 1090 MHz a dokáže měnit úroveň výstupního signálu.



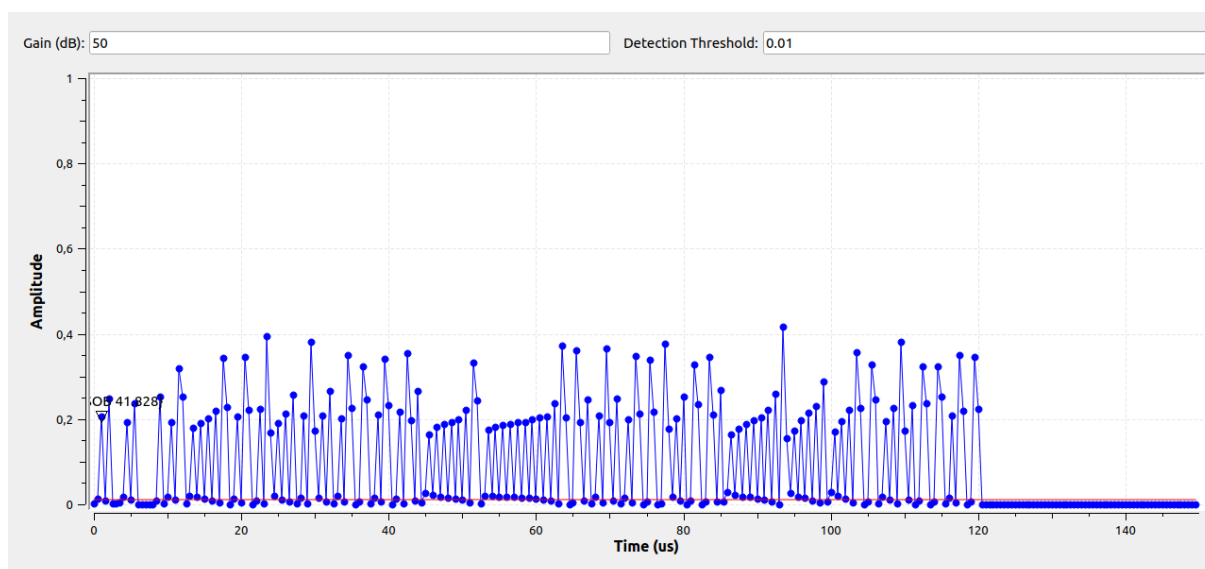
Obrázek 49 - Blokové schéma měřícího pracoviště pro ověření citlivosti systému

Mezi výstupem signálového generátoru a vstupem SDR Adalm-Pluto byl přidán rozbočovač signálu pro ověření signálového generátoru pomocí spektrálního analyzátoru nebo osciloskopu. Principem měření bylo postupné snižování úrovně výstupního signálu přímo na signálovém generátoru a současně sledování odezvy navrženého systému. Cílem bylo určit při jaké minimální úrovni signálu dokáže systém stále dekodovat přijatou zprávu. Prahovou hodnotou pro systém byla úroveň signálu -73 dBm v použité konfiguraci.

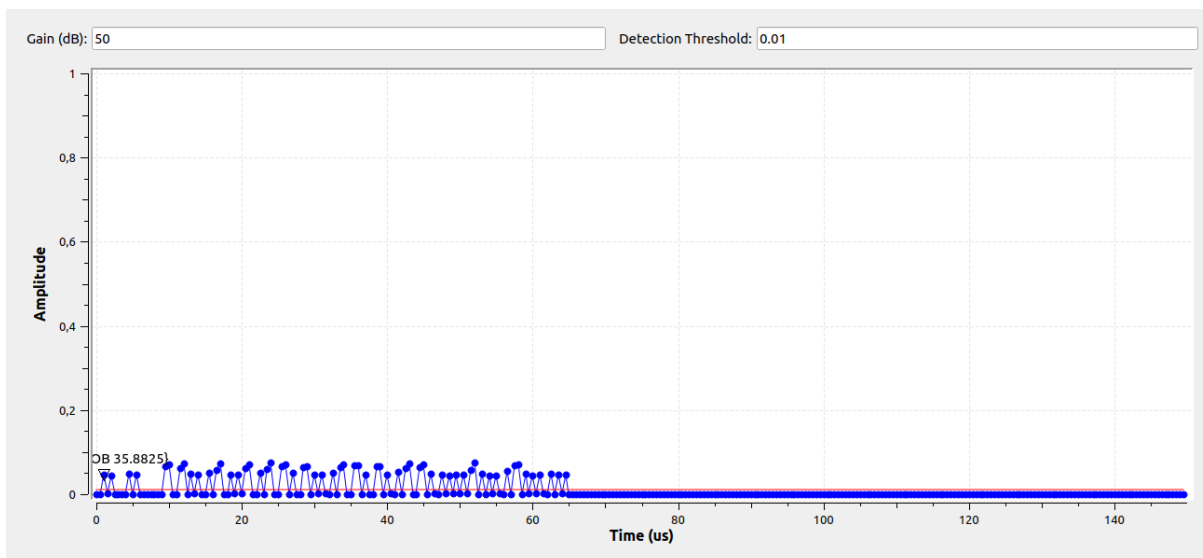


Obrázek 50 - Signálový generátor SIGLENT

Od samotného výsledku změřené citlivosti – 73 dBm lze odečíst útlum koaxiálního kabelu sucoform 86 mezi signálovým generátorem a SDR Adalm-Pluto o délce 2 metrů který činí 1,366 dB a útlum rozbočovače 3,26 dB. Výsledná citlivost přijímače je tedy -77,60 dBm. Obrázky č. 51 a 52 znázorňují úrovně signálu za řetězcem zpracování signálu v navrženém systému pro různé úrovně výstupního signálu na signálovém generátoru.



Obrázek 51 - Ukázky dekódovatelné úrovně přijaté zprávy



Obrázek 52 - Práh dekódovatelnosti přijaté zprávy

4.4 Ověření dotazů v módu S

Bylo provedeno ověření schopnosti příjmu a dekódování dotazu v módu S. Tento test byl proveden na stejném simulátoru, který byl popsán v předchozí kapitole, přičemž konfigurační soubor byl příslušně upraven. Vzhledem k tomu, že frekvence 1030 MHz není volně dostupná a není dovoleno na ní svévolně vysílat, byl signál přenášen přímo po kabelu na přijímač. Tímto způsobem bylo zajištěno, že simulace proběhla za kontrolovaných podmínek a zároveň bylo možné ověřit schopnost systému dekódovat dotazy. Na obrázku č. 53 je zobrazen záznam z kontrolního měření, přičemž vstupem do přijímače byl All-Call dotaz v módu S, tedy UF 11, který se využívá při navázání komunikace s konkrétním cílem.

```

Time    UF Target ICAO  MSG
12:34:11 11

```

Obrázek 53 - Záznam simulace dotazů All-Call (UF 11)

4.5 Výdrž napájení navrhnutého systému

Důležitou vlastností systému je především jeho schopnost pracovat bez přítomnosti napájení ze sítě, aby mohlo být plně mobilní. V souvislosti s ověřením funkčnosti zařízení bylo provedeno kontrolní měření. Tabulka č. 13 shrnuje teoretický odběr celého systému při plném vytížení, které je závislé nejen na okolních podmínkách, ale především na vytížení SDR.

Tabulka 13 - Energetická náročnost systému

Zařízení	Odběr [mA]
Raspberry Pi 4	1200-1400 (plné vytížení)
Dotykový displej	450
SDR Adalm-Pluto	500-550

V součtu činí teoretický odběr 2,4 A, přičemž dle vzorce č. (1.5) lze stanovit přibližnou výdrž systému, který je napájen z powerbanky o kapacitě 20000 mAh.

$$t = \frac{C}{I} = \frac{20\,000}{2,4} = \mathbf{8,33\ hod}, \quad (1.5)$$

Kde C – je kapacita powerbanky,

I – je celkový odběr proudu,

Během kontrolního měření byla naměřena výdrž téměř **9 hodin**. Dle teoretického výpočtu dosáhl systém lepších výsledků i za předpokladu, že teoretická výdrž je menší v závislosti na účinnosti samotné powerbanky. Výsledek skutečné výdrže byl ovlivněn především menším vytížením SDR.

Závěr

Účelem diplomové práce bylo seznámit se zprávami používanými v sekundárních přehledových systémech a návrh mobilního systému, který bude schopen v reálném čase zaznamenávat přijaté Mode S zprávy, které následně dokáže dekodovat a vizuálně prezentovat. S ohledem na náročnost samotného zpracování dané problematiky a její vlastnosti byl vybrán vhodný hardware a následoval vývoj programu v programovacím jazyce Python pro příjem Mode S zpráv v reálném čase s doplňkovými funkcemi filtrace, grafickou vizualizací a záznamem dekodovaných informací. Výstupem práce je zhotovený mobilní přijímač, jehož jádro tvoří mikropočítač Raspberry Pi 4, který řídí všechny procesy demodulace a dekodování v softwarové vrstvě, softwarově definované rádio Adalm-Pluto, které zajišťuje příjem IQ dat s pomocí antény VERT900, zobrazovací jednotka Waveshare 70H-1024600 a powerbanka zajišťující napájení celého systému.

V teoretické části byl popsán úvod do přehledových systémů včetně jejich rozdělení na základě principu činnosti. V souvislosti s tématem diplomové práce byla detailněji rozepsána problematika sekundární radiolokace a její součinnost s primárními přehledovými systémy. Zadáním diplomové práce je návrh zařízení schopné přijímat zprávy v módu S, proto byla v úvodní teoretické části popsána metodika dotazovačů a odpovídačů, které pracují na stejném principu společně s jejich výkonovou bilancí, která souvisí s dosahem těchto zařízení. Další náplní teoretické části je popis používaných módů v praxi a jejich rozdělení na základě technické specifikace, účelu a možnostech. Součástí popisu jsou jak starší módy A a C, tak aktuálně nejvyužívanější mód S. Velká část teoretické práce je věnována právě struktuře a vlastnostem tohoto módu, jelikož tyto metodiky jsou použity pro návrh programu pro dekodování. Důraz je zde kladen na běžně používané typy odpovědí včetně popisu jedné z nejrozšířenějších složek módu S a to ADS-B zprávám. V poslední řadě je teorie zaměřena na základní popis principu softwarově definovaných rádií zahrnující hardwarovou i softwarovou část společně s metodikou využívání IQ dat.

Další část diplomové práce je věnována popisu hardwaru, který byl použit pro návrh, sestavení a oživení. Jako přijímač signálů bylo použito softwarově definované rádio Adalm-Pluto, jež dovoluje využívat frekvence 1030 MHz a 1090 MHz s šířkou pásma až 20 MHz a vzorkovací frekvencí 2 Msps. Mikropočítač Raspberry Pi 4 B s pamětí 8 GB zajišťuje propojení všech ostatních modulů zařízení včetně distribuce napájení, které může být řešeno pomocí veřejné elektrické sítě s využitím vhodného adaptéru nebo pomocí powerbanky, která zajišťuje mobilitu celého systému. Prezentace dat a ovládání programu je plně podporováno prostřednictvím dotykového displeje, což umožňuje snadné a intuitivní používání přímo v terénu.

Předposlední část práce shrnuje všechny potřebné kroky pro konfiguraci SDR a Raspberry Pi společně se seznamem potřebných knihoven a nástrojů pro vývoj a provoz navrženého programu pro dekodování zpráv v módu S. Zařízení je schopno demodulovat a dekodovat odpovědi i dotazy v módu S. Součástí této části je i popis navržených funkcí zajišťujících

záznam dekódovaných dat do textového souboru, zobrazení grafu barometrické výšky a filtraci zpráv podle ICAO adresy nebo Call-signu.

V závěru práce jsou popsána měření pro ověření funkčnosti celého systému, zahrnující porovnání dekódovaných informací s informacemi platformy ADS-B Exchange. Během procesu sbírání dat od jednoho cíle bylo možné sledovat jaké informace cíl vysílá. Během první detekce většina cílů vysílala pouze ICAO adresu společně s barometrickou výškou, což jsou nejdůležitější informace. Jakmile systém dekóduje zprávu unikátního cíle (získá ICAO adresu), tak postupně doplňuje informace z dalších přijatých zpráv. Porovnávaná data se vždy shodovala s daty, které poskytovala platforma ADS-B Exchange. Pro úplnost byla porovnána data i s profesionálním systémem od společnosti ERA. Navržený systém dokáže efektivně detekovat aktualizované zprávy o jednom cíli i pro cíle v nízkých letových hladinách. Ze získaných poznatků této analýzy by systém mohl být doplněn o časovou synchronizaci, která by zajistila přesné časové značky jednotlivých zpracovaných zpráv. Výkonnost systému byla stanovena na základě poslední přijaté polohové zprávy od jednoho cíle, který vysílal informace o své poloze. Sledované cíle byly vybírány s podmínkou konstantní barometrické výšky 37000 ft. Výkonnost systému s nepříznivými podmínkami příjmu signálu s anténou ve výšce 217 m je 75 km. Zajištěním vhodnějších přijímacích podmínek, konkrétně umístěním antény do větší výšky a omezením negativních vlivů ovlivňujících výkon systému, byl dosah rozšířen na 160 km. Prahová hodnota pro detekci signálu neboli citlivost, byla změřena a výsledná hodnota je -73 dBm. Celé měření bylo prováděno se simulátorem, který dokáže generovat zprávy v módu S s konfigurovatelnými vlastnostmi, proto bylo možné vhodnou úpravou ověřit i zpracování dotazů na frekvenci 1030 MHz. Navržený systém byl schopen detekovat periodicky opakující se All-Call dotazy. Součástí ověřování funkčnosti systému bylo i ověření výdrže doby napájení z použité powerbanky, výsledná doba je 9 hodin. Výdrž je ovlivněna především odběrem konstantně zapnutého dotykového displeje a hustotou provozu, která ovlivňuje množství zpracovaných dat v měřeném úseku.

Literatura

- [1] BEZOUŠEK, Pavel a Václav ŠPÁS. *Historie radiolokační techniky v Československu*. Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-807395-693-6.
- [2] ReGuard, Multi-role 3D radar for the detection and tracking of ground and low-flying targets. In: *ReGuard* [online]. 2024 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: www.reguard.cz/en/wp-content/uploads/2024/01/ReGuard-EN.pdf
- [3] BEZOUŠEK, Pavel a Pavel ŠEDIVÝ. *Radarová technika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3036-9.
- [4] MSSR-1 Monopulse Secondary Surveillance Radar. In: *Eldis* [online]. 2020 [cit. 2024-08-25]. Dostupné z: <https://www.eldis.cz/mssr-1?bsgrid-col66117-id=68324&draftmode=0&do=bsgrid-col66117-download>
- [5] *Doc 9924, Aeronautical Surveillance Manual* [online]. Third edition. ICAO, 2020 [cit. 2024-02-12]. ISBN 978-92-9265-367-5. Dostupné z: <https://news.mcaa.gov.mn/uploads/bookSubject/2022-11/63733122d7ce9.pdf>
- [6] WOLFF, Christian. *Radartutorial* [online]. 1998 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: radartutorial.eu
- [7] *ERA a.s.* [online]. 2024 [cit. 2024-08-25]. Dostupné z: <https://www.era.aero/cs>
- [8] *Annex 10 - Aeronautical Telecommunications - Volume IV- Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems* [online]. 5th Edition. ICAO, July 2014. ISBN 978-92-9249-537-4. ANN-00010-005-04.
- [9] JUNZI, Sun. *The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals*. Second Edition. Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, 2021. ISBN 978-94-6366-402-8.
- [10] *ADS-B Exchange - track aircraft live* [online]. 2016 [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://globe.adsbexchange.com/>
- [11] ATKINSON, D., R. W. STEWART, L. CROCKETT a K. BARLEE. *Software Defined Radio Using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*. University of Strathclyde: Strathclyde Academic Media, 2015. ISBN 978-0-9929787-1-6.
- [12] *I/Q Data for Dummies* [online]. 2023 [cit. 2024-08-25]. Dostupné z: <http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ>

- [13] *ADALM-PLUTO* [online]. Analog Devices [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html#eb-overview>
- [14] Raspberry Pi 4. *Raspberry pi* [online]. 2012 [cit. 2024-08-25]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- [15] AlzaPower Manuál. *Alza.cz* [online]. 1998 [cit. 2024-08-25]. Dostupné z: <https://dwn.alza.cz/manual/75639>
- [16] VERT 900 datasheet. *Ettus Research* [online]. 2016 [cit. 2024-08-25]. Dostupné z: https://kb.ettus.com/images/2/2b/ettus_research_vert900_datasheet.pdf
- [17] 70H-1024600. *Waveshare Wiki* [online]. 2006 [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://www.waveshare.com/wiki/70H-1024600>
- [18] Z95J ABS. *Krabičky pro elektroniku* [online]. c2024 [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://www.krabicky-pro-elektroniku.cz/plastova-krabicka-z95j-abs--seda/>
- [19] *Pi-power-button* [online]. [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://github.com/Howchoo/pi-power-button>
- [20] *ADALM-PLUTO for End Users* [online]. [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users>
- [21] Operating system images. *Raspberry pi* [online]. 2012 [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/software/operating-systems/>
- [22] *Libiio* [online]. [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://github.com/analogdevicesinc/libiio>
- [23] *Python 3.0 Release* [online]. [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://www.python.org/download/releases/3.0/>
- [24] *GNU Radio* [online]. [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://www.gnuradio.org/>
- [25] *Gr-adsb* [online]. [cit. 2024-08-26]. Dostupné z: <https://github.com/mhostetter/gr-adsb>