

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

ÚSTAV LETECKÉ DOPRAVY



Diplomová práce

Návrh nízkonákladového MLAT systému

Bc. Martin Zach

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

30. května 2015



K621 **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Martin Zach

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Návrh nízkonákladového MLAT systému**

Název tématu (anglicky): Design of a low-cost MLAT system

Zásady pro vypracování

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

- Úvod
- Umístění přijímací stanice na koncové lokalitě
- Analýza přijímaných dat
- Návrh architektury nízkonákladového MLAT systému
- Závěr

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

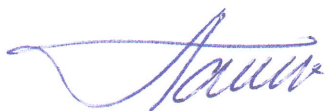
Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: ICAO Annex 10: Aeronautical Telecommunication, Volume IV, Surveillance and Collision Avoidance Systems, 2007
ICAO: Doc 7871 Technical Provision for Mode S Services and Extended Squitter, 2011
<http://www.multilateration.com/resources.html>
<http://wiki.modesbeast.com>

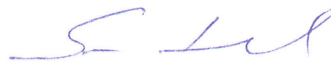
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **31. července 2014**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **31. května 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Daniel Hanus, CSc.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Martin Zach
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....31. července 2014

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D. za možnost zúčastnit se projektu studentské grantové soutěže ČVUT s názvem „Vývoj nízkonákladového přehledového řešení pro nekritické aplikace v oblasti všeobecného letectví“, díky kterému jsem se dostal k tématu této práce. Dále za trpělivost, podporu, cenné rady a informace při psaní této práce. V neposlední řadě chci poděkovat kolegům z projektu studentské grantové soutěže, Lukáši Umlaufovi a Tomáši Liptákovi.

Prohlášení

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

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

V Praze dne 30. května 2015



.....

Abstrakt

Autor: Bc. Martin Zach

Název práce: Návrh nízkonákladového MLAT systému

Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní

Ústav: Ústav letecké dopravy

Rok vydání: 2015

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

Počet stran: 77

Počet příloh: 4

Cílem této diplomové práce je analyzovat hardware potřebný k fungování multilateračního systému, vybrat nejlepší vhodná zařízení a následně navrhnout kompletní architekturu MLAT systému. Druhotnými cíli jsou: experimentální analýzy ADS-B dat, návrh a umístění přijímacích stanic a návrh a vytvoření pomocného softwaru.

Klíčová slova: ADS-B, MLAT, Pozemní stanice, ATC

Abstract

Author: Bc. Martin Zach

Title of the Thesis: Design of a Low-Cost MLAT system

University: Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Science

Department: Department of Air Transport

Year of Issue: 2015

Thesis Supervisor: Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

Number of pages: 77

Number of attachments: 4

The goal of this Master's thesis is to analyze hardware needed for a good function of a multilateration system, choosing the best suitable devices and finally designing a complete architecture MLAT system. Secondary objectives are: an experimental analysis of ADS-B data, designing and placement of receiving ground stations and designing and programming of utility software.

Keywords: ADS-B, MLAT, Ground station, ATC

Obsah

Úvod	1
1 Princip, historie a možné aplikace multilateračních systémů	3
1.1 Historie multilaterace	3
1.2 Základní princip multilaterace	3
1.3 Možné aplikace multilateračních systémů	5
2 Hardwarové prvky multilateračních systémů	8
2.1 Přijímací zařízení	8
2.1.1 microADSB - BULLION	9
2.1.2 GNS 5890/5892	10
2.1.3 Kinetic Avionics 1090/SDR Puck	10
2.1.4 AirSpy	12
2.1.5 SDR DVB tunery	13
2.1.6 Radarcape	15
2.1.7 Závěrečné hodnocení přijímacích zařízení	20
2.2 Hardware pro pozemní přijímací stanici	21
2.2.1 Zapouzdření přijímacího zařízení	21
2.2.2 Napájení pozemní stanice	24
2.2.3 Datový přenos mezi MLAT stanicí a výpočetním střediskem	32
3 Návrh architektury nízkonákladového MLAT systému	35
3.1 Hardwarová architektura systému	35
3.2 Softwarová architektura systému	39
3.2.1 Softwarové procesy na úrovni centrální redistribuční stanice	39

3.2.2	Softwarové procesy na úrovni výpočetního centra . . .	41
4	Aktuální stav přijímacích stanic Fakulty dopravní	43
4.1	Koleje Strahov	43
4.2	Pankrác	49
4.3	Plánované lokality pro budoucí stanice	50
5	Návrh pomocného softwaru pro MLAT systém	52
5.1	Ovládací software pro relé desku a RaspberryPi	52
5.2	Software pro opakovaný záznam dat z přijímačů	53
5.3	Software pro vytvoření jednorázového záznamu dat z přijímačů	58
5.4	Webový server MLAT systému	59
5.5	Automatizační skript pro cyklické spouštění MATLAB skriptu	61
6	Analytické nástroje	62
6.1	Mode S dekodér	62
6.2	Skript pro hodnocení kvality příjmu ADS-B přijímače	65
	Závěr	71
	Literatura	73
	Seznam použitých zkratk	75
	Seznam příloh na CD	77

Seznam obrázků

1.1	Schéma zobrazující základní princip radiolokace pomocí multilaterace (převzato z [14]).	4
1.2	MLAT systém novozélandského letiště v Queenstownu (převzato z [6]).	5
1.3	Schéma zobrazující problém radarového krytí v závislosti na terénu (převzato z [14]).	6
2.1	Přijímač Bullion. Vlevo v konfiguraci bez Wi-Fi a vpravo včetně (převzato z [4]).	9
2.2	Vlevo přijímač GNS 5892 a vpravo GNS 5890 (převzato z [8]).	10
2.3	Přijímač Kinetic PUCK (převzato z [11]).	11
2.4	Širokopásmový SDR přijímač AirSpy (převzato z [2]).	12
2.5	SDR stick typu RTL2832/R820T (zdroj: autorův archiv).	13
2.6	Program pro SDR přijímače ModeSDeco2 (převzato z [16]).	14
2.7	První ADS-B přijímač Fakulty dopravní - Radarcape RC68 (zdroj: autorův archiv).	15
2.8	Menu webového serveru přijímače Radarcape (zdroj: autorův archiv).	17
2.9	Prezentace GPS dat v programu Trimble Studio (zdroj: autorův archiv).	18
2.10	Přijímací stanice Fakulty dopravní umístěná na Strahovských kolejích (zdroj: autorův archiv).	22
2.11	Profesionální přijímací stanice WAM systému společnosti ERA a.s., umístěná v Kapském Městě (převzato z [6]).	23
2.12	Vlevo injektor a splitter pasivního POE systému (AirLive Passive PoE Kit) a vpravo aktivní POE systém (AirLive POE-100AF) (převzato z [15]).	25

2.13	Powerbanka ADATA PV110 s kapacitou 10400 mAh (převzato z [1]).	26
2.14	Vybrané prvky ostrovního systému. Vlevo fotovoltaický panel, uprostřed nahoře solární regulátor, uprostřed dole měnič napětí a vpravo olovený akumulátor (převzato z [5]).	31
2.15	Příklad profesionální MLAT stanice od společnosti ERA a.s. na Novém Zélandu, napájené fotovoltaickými panely (převzato z [3]).	31
2.16	Systém bezdrátového spoje Motorola Canopy (převzato z [5]).	34
3.1	Základní struktura obecného MLAT systému.	35
3.2	Vnitřní struktura pozemní přijímací stanice	36
3.3	Navrhovaná architektura systémů v laboratoři ATM systémů pro jeho využití jako centra MLAT systému.	37
3.4	Architektura centrální redistribuční stanice	38
3.5	Softwarová úprava dat v Datovém redistribučním centru.	39
3.6	Procesy probíhající v zařízeních ATM laboratoře.	41
4.1	Výsledný vzhled boxu strahovské přijímací stanice (zdroj: autorův archiv).	44
4.2	Úprava vnitřního panelu pro instalaci v boxu přijímací stanice (zdroj: autorův archiv).	45
4.3	Schéma napájecího obvodu pro rozvod 5 V napětí v boxu přijímací stanice.	46
4.4	Vlevo přijímací anténa 1090 MHz + černá GPS a vpravo zapojení internetem ovládané zásuvky IQSW-IP10 (zdroj: autorův archiv).	48
4.5	Schéma propojení zařízení na střeše a v serverové místnosti (zdroj: autorův archiv).	49
4.6	Mapa lokalit vhodných pro umístění přijímacích stanic (převzato z [9]).	51
5.1	Schéma zapojení relé desky do RaspberryPi.	53
5.2	Průběh cyklického nahrávacího programu pro účely neustálého záznamu dat z přijímacích stanic.	57
5.3	Průběh jednorázového nahrávacího skriptu.	58
5.4	Vlevo maximální dosah přijímače Strahov a vpravo přijímače Pankrác (zdroj: instalace programu Virtual Radar Server).	60
5.5	Statistika počtu přijatých zpráv na jednom přijímači za 24 hodin. Červená data znamenají zprávy obsahující polohu a modrá jakékoli zprávy (zdroj: instalace programu ModeSmixer2).	60
6.1	Mapa výskytu letadel po dobu trvání záznamu (zdroj: MATLAB).	67

Seznam tabulek

2.1	Hodnoty intenzity světla (v lednu) na Strahově (převzato z [7]).	28
2.2	Parametry panelů NETC (převzato z [5]).	29
2.3	Hodnoty obvyklé intenzity světla dopadajícího na plochu panelu NETC-M15.	29
2.4	Denní výkonové hodnoty zvolených panelů NETC.	30
2.5	Hodnoty zpoždění síťových uzlů mezi severem v ATM laboratoři a ADS-B přijímačem na Pankráci.	33
3.1	Zařízení použitá pro pozemní stanici + cenová kalkulace.	36
6.1	Výsledky překladu zpráv typu DF4, obsahující výšku a další informace.	64
6.2	RTCA DO-260B, Table 2-79 (převzato z [17])	68

Úvod

V první části diplomové práce se stručně věnuji hlavnímu principu funkčnosti a historii multilateračních systémů, které se v poslední době často využívají jako náhrada sekundárních radarů (SSR) v místech, kde je omezeno radarové krytí, například z důvodů terénních nerovností nebo hornatého terénu.

Druhá část této práce je věnována analýze hardwarových možností multilateračních systémů. Navazuji zde na informace uvedené v mé bakalářské práci na téma „ADS - B a VKV přijímače pro Fakultu dopravní ČVUT“ z roku 2013, kde jsem analyzoval parametry ADS-B přijímačů pro potřeby Ústavu letecké dopravy na Fakultě dopravní ČVUT, mimo jiné pro potřeby multilateračního systému. Od doby vydání této práce se změnila situace na trhu a tyto změny je třeba uvést a brát v potaz. Také zde budou uvedeny parametry a vlastnosti přístrojů, které mohou mít využití v multilateračním systému. Jedná se například o napájecí zařízení, zařízení pro distribuci dat a další.

Třetí část je věnována hlavně architektuře multilateračního systému. Jsou zde analyzovány jednotlivé prvky systému, jejich vlastnosti a požadavky na ně. Je zde řešeno propojení prvků MLAT systému, jejich parametry, vzájemná spolupráce a teoretický návrh systému pro Fakultu dopravní.

Ve čtvrté části opět navazuji na svou již zmíněnou bakalářskou práci, která vyústila v nákup tří ADS-B přijímačů Fakultou dopravní. Tato zařízení byla v rámci dohod a smluv umístěna na stabilní pozice, aktuálně na střeších několika budov v Praze. Budu se zde věnovat výběru aktuálních, případně budoucích lokalit a hardwarové konfiguraci konkrétních přijímačích stanic.

Pátá část je tedy věnována návrhu pomocného softwaru. Některé softwarové prvky využitelné v multilateračním systému jsem sám naprogramoval,

proto zde popíši jejich princip a funkci.

V šesté, poslední části se zabývám vytvořením analytických nástrojů, které jsou schopny zpracovávat data z ADS-B/MLAT systémů. Výsledkem těchto nástrojů jsou analýzy vzdušného prostoru a výkonnostní parametry přijímačů.

Na závěr shrnuji veškeré nabyté poznatky o návrhu a konstrukci multilateračních systémů a zároveň zde hodnotím možné využití takového systému jak pro vědecké, tak i pro praktické využití v oblasti všeobecného letectví.

Princip, historie a možné aplikace multilateračních systémů

1.1 Historie multilaterace

Historie multilaterace se datuje již do 60. let 20. století, kdy společnost Tesla, sídlící v Pardubicích, začala pracovat na pasivních radiolokačních systémech. V roce 1994 byla založena společnost ERA a.s., která se zasloužila o mezinárodní rozmach multilateračních a pasivních radiolokačních systémů. Roku 1995 zde skupina inženýrů začala pracovat na využití multilaterace v civilním letectví, což vyvrcholilo v roce 2002 instalací světového unikátu - prvního WAM systému na letišti Ostrava - Mošnov a jeho následnou certifikací v roce 2003.

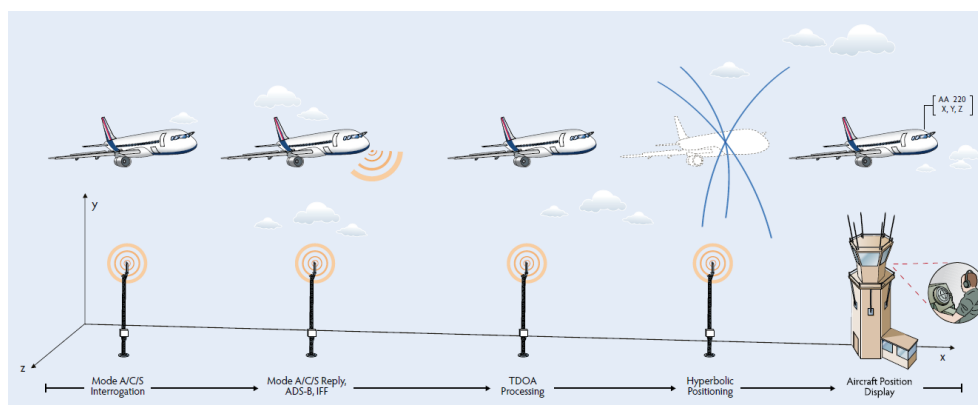
1.2 Základní princip multilaterace

Hlavním principem multilaterační radiolokační metody je příjem totožného signálu na více přijímacích stanicích v rozdílném čase. Tomuto časovému rozdílu se říká „Time Difference Of Arrival“, zkráceně TDOA. Pro takový systém je tedy nutná přesná časová synchronizace přijímacích hodin na všech přijímacích stanicích a tedy i přesné časové označení příchodu signálu. V letectví se využívá odpovědí letadel na radarové dotazy, ADS-B nebo, v případě aktivní multilaterace, i odpovědí na dotazy vlastního dotazovače, který je součástí systému. Konkrétně se tedy jedná o zprávy modu A, C a S. Letadlo tedy vyšle jeden ze zmíněných signálů, ten se díky rozdílné délce tras k přijímacím stanicím bude k těmto stanicím šířit různou dobu, a proto se bude čas přijetí konkrétní zprávy lišit na všech přijímacích

stanicích. Pro vytváření časových údajů existují 2 metody:

- Metoda distribuovaného času
- Metoda centrálního času

Metoda distribuovaného času zahrnuje značkování zpráv časovým údajem již na úrovni přijímací stanice na rozdíl od metody centrálního času, kde se zpracování času řeší až na úrovni centrálního výpočetního zařízení. V případě distribuovaného času jsou přijímací jednotky komplexnější díky přítomnosti čas zpracujících zařízení. V případě centrálního času jsou přijímací stanice jednodušší, avšak je třeba mít možnost změřit a znát veškeré možné prodlevy na trase mezi centrálním zařízením a přijímačem. Zde probíhá vyhledání shodných zpráv, které jsou následně předány výpočetní části systému. Ta z každého časového rozdílu příchodu zpráv na dvou přijímacích - TDOA vytvoří jednu hyperbolu ve dvoudimenzionálním prostoru a hyperboloid v prostoru třídimeznionálním. Takto vzniklé hyperboly, přesněji hyperboloidy, se v prostoru protnou a tento průsečík všech hyperboloidů je místem, odkud byl signál vyslán, tedy pozicí vysílajícího letadla. Pro dvoudimenzionální radiolokaci je třeba zachytit zprávu na minimálně třech přijímacích stanicích a pro třídimeznionální na čtyřech.



Obrázek 1.1: Schéma zobrazující základní princip radiolokace pomocí multilaterace (převzato z [14]).

1.3 Možné aplikace multilateračních systémů

Multilaterační systémy mají několik možných oblastí využití:

1. **Wide Area** - Širší oblast působení multilateračního systému. Samotné stanice od sebe mohou být až 100km a dosah takového systému může být ještě větší. Takovýto systém je schopen plně nahradit sekundární radary, zabezpečující v dané oblasti lokalizaci letadel. Díky ADS-B je MLAT systém v ideálním stavu schopen aktualizovat polohovou informaci jednou za cca 0,5 s, což u sekundárních radarů závisí hlavně na rychlosti otáčení přijímací antény. Jedním z dalších důvodů zavádění může být snaha o snížení nákladů nebo nahrazení sekundárních radarů. Energetická náročnost radaru je totiž několiknásobně vyšší, než multilateračního systému. Konkrétně spotřeba radaru je cca. 12 kW (v závislosti na typu) na rozdíl od MLAT stanice, která využívá cca 50 W. Takovýto systém je ideální do horských nebo souostrovnických oblastí, díky své prostorové flexibilitě.
2. **Local area** - Koncové oblasti jsou používány zejména pro vzlety a přistání, což znamená letadla s menší vzájemnou vzdáleností a tedy požadavek na co nejčastější aktualizaci polohové informace. Na koncové oblasti má velký vliv i okolní terén.

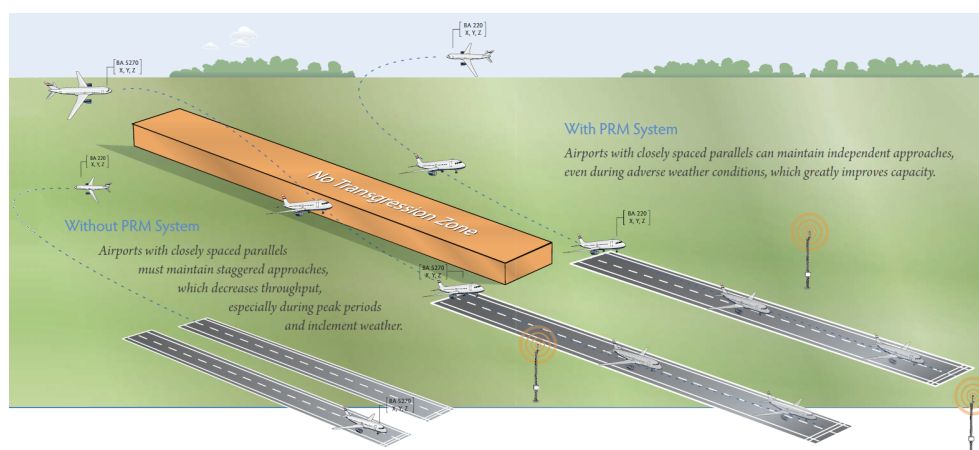


Obrázek 1.2: MLAT systém novozélandského letiště v Queenstownu (převzato z [6]).

1.3. Možné aplikace multilateračních systémů

Pokud je například letiště v hornaté oblasti, vlastní radar by mu umožnil pouze omezené krytí v závislosti na okolním terénu, na rozdíl od MLAT systému, který díky většímu počtu přijímacích stanic umožňuje lepší krytí. Příkladem je MLAT systém v novozélandském Queenstownu, obrázek 1.2.

3. **Airport surface** - Díky snaze kontrolovat pohyb po letištních plochách je zde potřeba získání polohových dat pro vstup do systému A-SMGCS, který se stará o kontrolu pohybů, směřování a predikci sblížení na letištní ploše. Donedávna vstupem takového systému byly pouze pojezdové letištní radary. Jedná se o složité zařízení fungující na principu primárního radaru. Negativní vlastností takového radaru je však jeho vysoká citlivost na odražené signály a složité přiřazení identifikace k detekovanému cíli. Díky několika MLAT stanicím je nyní možné pokrýt celou letištní plochu a mít přesnější data na vstupu do systému A-SMGCS.
4. **Precision Runway Monitoring** - V případě paralelních drah je možné pomocí MLAT systému definovat zakázané oblasti mezi osami obou drah, včas tím detekovat odklonění letadel z osy dráhy a zamezit tak kolizi s letadlem využívajícím jinou přistávací dráhu. Díky pravidelnější obnově polohové informace mohou letadla provádět přiblížení nezávisle na letadlech využívajících paralelní dráhu nebo na počasí, čímž se může zvýšit kapacita dráhy až o 30%.



Obrázek 1.3: Schéma zobrazující problém radarového krytí v závislosti na terénu (převzato z [14]).

Za tímto účelem bylo také navrženo zařízení zvané „Precision Runway Monitor“ (PRM), které umožňuje precizní lokalizaci letadel a tím i snížení rozestupů až na vzájemnou vzdálenost 1km. Bohužel od zavádění tohoto zařízení se upustilo z důvodu vysoké pořizovací a provozní ceny.

5. **Height Monitoring Unit** - Díky preciznímu výpočtu polohy je v multilateračním systému vypočtena i vertikální souřadnice letadla - výška. Tato hodnota se následně porovná s výškou vysílanou letadlem, jejímž zdrojem je palubní výškoměr, čímž se získá přesnost palubního výškoměru, s jejíž pomocí je možné na konkrétní letadlo aplikovat maximální snížení vertikálních separačních minim (RVSM) možných pro jeho kategorii nepřesnosti výškoměru.
6. **Environmental Management** - Pomocí přesných dat z MLAT systémů lze přesně modelovat environmentální zatížení letiště a identifikovat případné problémy s ním spojené. Další možností je přesná kontrola stížností na výskyt letadla ve specifickou dobu v omezených oblastech, případně stěžovatelům dokázat opak, což je bez přesných dat složité.
7. **Airport Operations & Revenue Management** - MLAT systém je schopen poskytnout potřebná data z letištní plochy pro podporu CDM a pro potřeby dalších operátorů pohybujících se po letištní ploše.

Hardwarové prvky multilateračních systémů

2.1 Přijímací zařízení

Když jsem ve své bakalářské práci ([21]) analyzoval parametry nízkonákladových ADS-B přijímačů, psal se rok 2013 a situace na trhu byla značně odlišná od situace, která je na trhu nyní. Zmiňoval jsem společnosti Kinetic Avionics Ltd., Aurora Eurotech, AirNav Systems, dále přijímač BEAST a tehdejší novinku na trhu - přijímač od společnosti FlightRadar24. Od roku 2013 se objevilo několik nových přijímačů:

- **microADSB - BULLION**
- **GNS 5890/5892**
- **Kinetic Avionics 1090/SDR Puck**
- **AirSpy**
- **RTL2832/R820T DVB tuner**
- **Radarcape**

Jak vidno, společnost Kinetic Avionics přišla na trh s novým produktem, vznikla společnost Planevision Systems GmbH, založená tvůrcem méně známého přijímače BEAST, která vytvořila absolutní špičku na trhu - Radarcape. Největší rozmach na trhu však zažívají SDR přijímače.

V následující části shrnu informace dostupné o těchto nových přijímačích a analyzuji jejich možné využití v MLAT systémech.

2.1.1 microADSB - BULLION

Tento přijímač navrhla a sestrojila společnost Anteni.net Ltd. Jediněné na tomto přijímači jsou způsoby připojení, kde kromě standardních modelů s USB a Ethernet+USB je v nabídce i model, který disponuje i Wi-Fi modulem pro bezdrátovou komunikaci. Další zajímavostí je, že modely Ethernet+USB mají možnost přímého napájení přes ethernetový kabel - Power over Ethernet. To eliminuje nutnost přivést k přijímači jiný než Ethernet kabel.

Výstupní formát přijímače je buď již dekodovaný, nebo v hexadecimálním formátu. Přijímač také disponuje integrovaným značkovačem zpráv pomocí 12MHz hodin, nicméně tato možnost nezajišťuje přesnou časovou synchronizaci.

Otázkou je, pokud k přijímači v konfiguraci s Wi-Fi povedeme napájecí kabel, proč rovnou nevést Ethernet kabel a nevyužít POE? Samotný přijímač bez bezdrátového modulu stojí 199 €, včetně 5 dBi antény.

Z důvodů nevhodného způsobu získávání časové značky není tento přijímač vhodný pro využití v MLAT systému.



Obrázek 2.1: Přijímač Bullion. Vlevo v konfiguraci bez Wi-Fi a vpravo včetně (převzato z [4]).

2.1.2 GNS 5890/5892

Tyto 2 přijímače jsou vyrobeny firmou Global Navigation Systems - GNS GmbH, sídlící v Německu. Produkt GNS 5890 je přenosné zařízení typu USB stick, na rozdíl od produktu GNS 5892, což je zařízení typu BOX - pro stabilní instalace. Z informací uvedených na stránkách výrobce si troufám tvrdit, že tento přijímač nedisponuje žádnou speciální funkcí a vše, co nabízí, se dá sehnat od konkurence za nižší cenu. Přesné časové značkování zpráv není na straně přijímače nijak řešeno. Na výstupu z přijímače jsou pouze hexadecimální ADS-B zprávy.



Obrázek 2.2: Vlevo přijímač GNS 5892 a vpravo GNS 5890 (převzato z [8]).

2.1.3 Kinetic Avionics 1090/SDR Puck

Společnost Kinetic Avionics Limited je na trhu s ADS-B přijímači nejdéle a také se snaží držet krok s dobou. Tak vznikl „PUCK“, jako reakce na stoupající poptávku po ADS-B přijímačích za co nejnižší cenu. Tomuto požadavku vyhovují hlavně SDR (Software Defined Radio) přijímače. SDR tedy označuje zařízení, které samotný signál převádí do digitální podoby a jeho zpracování probíhá až na softwarové vrstvě jiného zařízení. U klasických zařízení zpracování signálu zajišťuje hardware.

Oba přijímače kombinují skoro všechny možnosti aplikace SDR v letectví. 1090Puck je reakcí na poptávku po levnějších ADS-B přijímačích -

za cenu 250 £ dostane uživatel prakticky stejné vlastnosti jako u zařízení, které prakticky začalo éru low-cost ADS-B přijímačů - SBS1. Zařízení má kompaktní rozměry a k napájení stačí USB.

SDR Puck je přístroj reagující na moderní využití SDR přijímačů - k odposlechu letecké komunikace. Díky softwarovému překladu signálu je možné kontinuálně monitorovat až 6 kanálů s rozestupem 8 MHz, což prakticky znamená, že toto zařízení je schopné plnit funkci šesti VKV přijímačů. Problém samozřejmě nastává, pokud se přijímané audio zprávy začnou překrývat. Toto zařízení má stejnou cenu jako 1090Puck a v kombinaci s ním vytváří perfektní přehledové stanoviště. Bohužel samotné zařízení nepřekládá signál, není tedy schopno značkovat zprávy časovou značkou, což ovlivňuje využití pro multilaterační účely. Existuje však metoda, díky které je možné pomocí GNSS přijímacího modulu značkovat zprávy na výstupu z překládacího softwaru.



Obrázek 2.3: Přijímač Kinetic PUCK (převzato z [11]).

Takováto SDR zařízení se obvykle připojují pomocí USB do zařízení, kde probíhá softwarové dekódování signálu. Pro tyto potřeby se používají miniaturní počítače - obvykle RaspberryPi. Připojí-li se k tomuto MiniPC GPS modul schopný vysílání jednoho pulzu za sekundu (1PPS), je možné naprogramovat zařízení, aby hned po dekódování signálu označilo zprávu přesnou

značkou s GPS časem. Tato metoda však naráží na zásadní problém, kterým je časová prodleva mezi příchodem zprávy na anténu a samotným přidáním časové značky. Tuto prodlevu nelze nijak jednoduše změřit a následně ji kompenzovat. Vzniká zde tedy chyba, kterou nejsme schopni ovlivnit. Ne-profesionálním řešením tohoto problému by bylo vytvoření MLAT systému čistě z takovýchto zařízení za předpokladu, že díky totožnosti všech zařízení by se prodleva projevila na všech přijímačích stejná a vykrátila se.

2.1.4 AirSpy

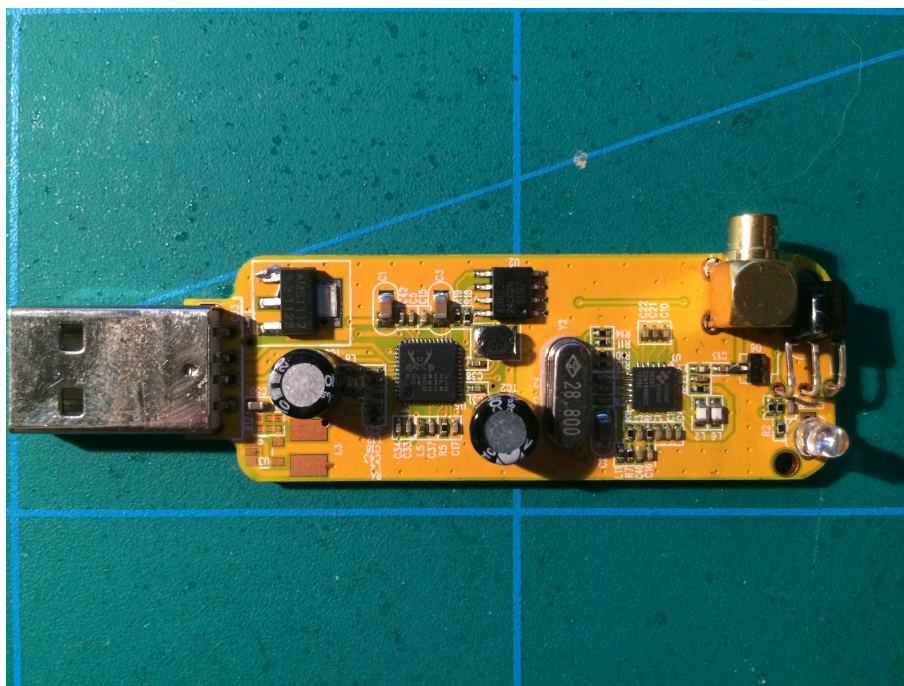
AirSpy je další zařízení typu SDR. Hardwarově má sice skvělé parametry, ale jako u všech ostatních SDR přijímačů, i u něj existuje neměřitelná prodleva mezi příchodem signálu na anténu a jeho dekodáží v jiném zařízení.



Obrázek 2.4: Širokopásmový SDR přijímač AirSpy (převzato z [2]).

2.1.5 SDR DVB tunery

Tato zařízení v poslední době způsobila boom na trhu s ADS-B přijímači. Jedná se o absolutně nejlevnější zařízení, se kterým lze přijímat zprávy Modu A, C a S. Jde o zařízení navržené pro zprostředkování digitálního televizního vysílání, jehož firmware byl skupinou vývojářů upraven tak, aby bylo možné zařízení využívat jako klasické a mnohonásobně dražší SDR přijímače. Jeho cena se pohybuje kolem cca 10 \$ a za to uživatel obvykle dostane samotný USB stick, CD s ovladači pro přehrávání digitální televize a kompaktní anténu. Tato metoda příjmu se dá aplikovat na mnoho typů DVB přijímačů, pocházejících převážně z Číny - proto tak nízká cena. Přijímače se liší jak velikostí, tak konektivitou. Lze nalézt typy, které jsou menší než krabička od sirek, ale obvykle se jedná o klasický rozměr flash disků. Nejčastějším rozdílem je konektor pro připojení antény, obvykle typu IEC nebo MCX, původní konektor se obvykle dá odpájet a osadit přijímač novým konektorem dle požadavků.



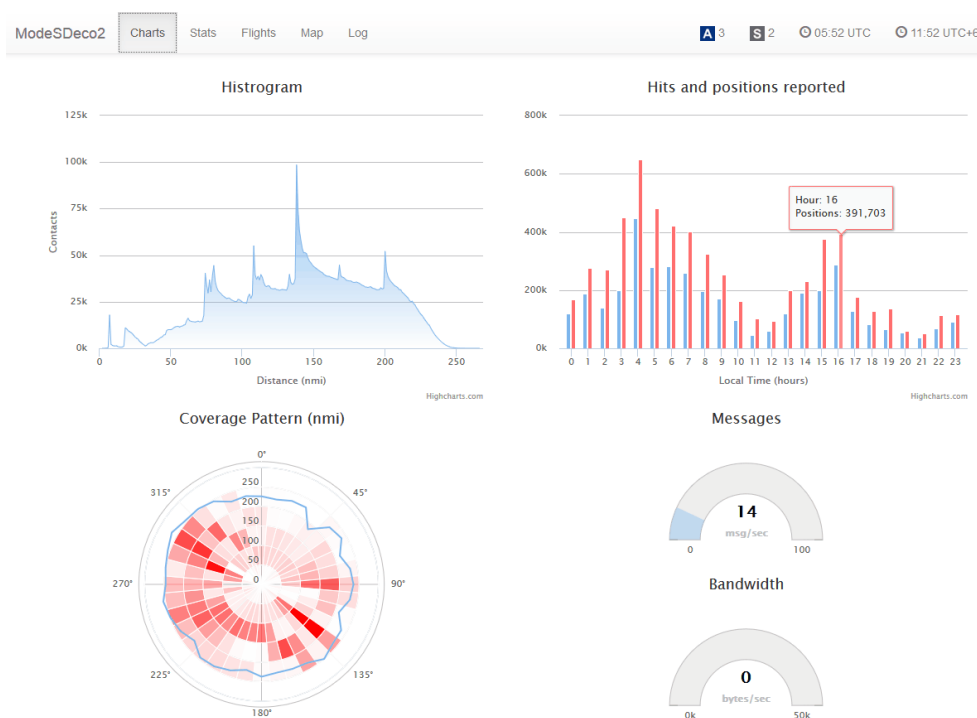
Obrázek 2.5: SDR stick typu RTL2832/R820T (zdroj: autorův archiv).

Vzhledem k faktu, že tyto SDR přijímače potřebují další zařízení pro dekódování signálu, používají se obvykle v kombinaci se starými PC nebo miniPC. Nejčastěji se zařízení kombinují s mini-počítačem RaspberryPi,

2.1. Přijímací zařízení

což je zařízení o velikosti cca 2 kreditních karet. Spotřeba RaspberryPi je včetně SDR cca 10 W. Výhodou kombinace s rPi je hlavně jeho všestrannost - zařízení může současně fungovat jako FTP server, HTTP server, ADS-B přijímač a to vše bez ztráty výkonu pro ADS-B. Dokonce se k zařízení dá připojit několik SDR a některá mohou fungovat pro audio kanály a jiná pro ADS-B.

Stejně důležitý jako dekodovací hardware je taktéž software. Software zde stojí za překladem informací z binárních jedniček a nul v signálu do hexadecimálních nebo jinak přeložených zpráv. Dříve se nejčastěji používaly programy jako rtl1090, adsbScope a další, které zpracovaly signál a nabídly ho k dispozici v lokálním zařízení. Dnes je pro SDR nejlepší volbou program ModeSDeco2, který je schopen jak překládat signál, tak i prezentovat výstup na vlastním webovém serveru, vytvářet statistiky, zakreslovat letadla do mapy, analyzovat dosah a ještě mnohem víc.

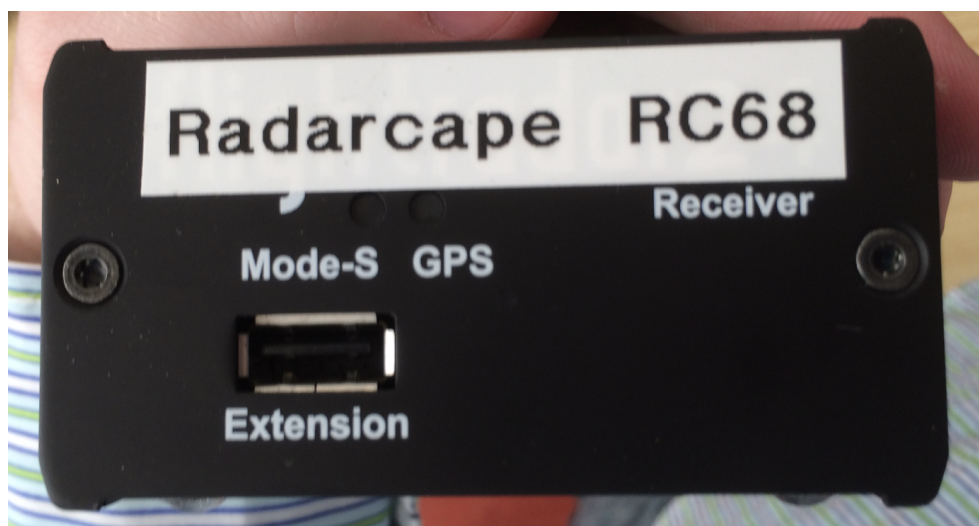


Obrázek 2.6: Program pro SDR přijímače ModeSDeco2 (převzato z [16]).

2.1.6 Radarcape

V mé, již zmíněné, bakalářské práci byl tento přijímač uváděn jako novinka a budoucí špička na trhu pod názvem FlightRadar24 receiver. Výrobce je firma Planevision Systems GmbH vedená Günterem Köllnerem, který navrhl přijímač Beast. Tato firma se prakticky z nuly stala absolutní špičkou na trhu s ADS-B přijímači a nyní je dodavatelem všech přijímačů pro společnost FlightRadar24, která vytváří celosvětovou síť ADS-B přijímačů. Vzhledem k velikosti zákazníka vznikl stejně „velký“ produkt - přijímač Radarcape, který do sebe integruje naprosto všechny požadované vlastnosti na přijímač pro nízkonákladový MLAT systém.

Fakulta dopravní byla schopna, díky Studentské grantové soutěži (SGS) ČVUT, do dnešní doby zakoupit 3 tyto přijímače. První přijímač byl zakoupen v říjnu 2013 pro potřeby práce na projektech SGS, které na Ústavu letecké dopravy v tu dobu probíhaly.



Obrázek 2.7: První ADS-B přijímač Fakulty dopravní - Radarcape RC68 (zdroj: autorův archiv).

První přijímač Radarcape RC68 (na obrázku 2.7) byl po nákupu provizorně umístěn v laboratoři ATM systému Fakulty dopravní v budově Horská. Jednalo se o první kus, který jsme kdy měli možnost testovat, ale bohužel přijímač vykazoval značnou nestabilitu - často se zasekával tak, že ho nebylo možné jakkoli ovládat. To znamenalo problém v případě, že v okolí přijímače nebyl nikdo, kdo by ho fyzicky restartoval. Po nějaké době

takovéhoto fungování jsme se rozhodli kontaktovat výrobce, který nám po reklamování a přijetí přijímače obratem bez otálení poslal nový kus.

Nyní stručně k vlastnostem přijímače:

- **Linux + FPGA** - Zařízení v sobě integruje nejlepší kombinaci dekodování zpráv pomocí FPGA a platformu LINUX, na které funguje veškerý software.
- **BOX stand-alone zařízení** - Jedná se o krabicovou verzi zařízení, které se může snadno umístit na jakékoliv hůře dostupné místo, co nejbliž k přijímací anténě a nepotřebuje k sobě žádné sekundární zařízení.
- **Ethernet připojení k síti** - Konfigurace zařízení je nyní 100% závislá na přenosu dat přes ethernet kabel. Starší verze bylo možno konfigurovat pomocí USB, to ale v nových není podporováno a je k dispozici pouze pro ADS-B výstup.
- **5V napájecí napětí** - Standardní napájecí napětí, které umožňuje pomocí periferních zařízení upgrade, jako například POE, solární napájení a další. Spotřebu výrobce uvádí 5 W. Mnou provedeným měřením jsem dospěl k hodnotě maximálně 4 W ve špičce s připojenou GPS anténou. V případě připojení periferních zařízení do USB se spotřeba zvýší.
- **SSH připojení pro konfiguraci přijímače** - Díky absenci možnosti konfigurace pomocí USB je SSH jedinou možností, jak přijímač nakonfigurovat. Jedná se pouze o některá nastavení, například nastavení IP adresy, přístupového hesla a také restart systému.
- **Webový server** - Primární konfigurační nástroj, popíši ho ve speciální kapitole.
- **GPS modul** - Zásadní faktor volby tohoto přijímače pro MLAT systémy. Každá zpráva je zde označena časovou značkou GPS synchronizovaných hodin, pokud si to uživatel přeje. GPS možnostem věnuji speciální kapitolu.
- **Konektivita** - Přijímač disponuje dvojicí anténních konektorů. Pro připojení 1090 MHz antény je zde SMA konektor a pro GPS konektor SMB. Jedná se o standardní konektory kompaktní velikosti. Dále jsou zde konektory USB a mini-USB. USB konektor je možné použít pro Wi-Fi adaptér, flash paměť nebo jiné periferie a mini-USB je zde

pouze pro přenos ADS-B dat ve formátu nastavitelném ve webovém rozhraní.

2.1.6.1 Webový server

Webový server funguje jako nástroj pro zjišťování stavu přijímače, a také je hlavním konfiguračním nástrojem. Kromě statické IP adresy se zde nastavují všechny důležité možnosti. Interface se za dobu, po kterou Fakulta dopravní vlastní tento přijímač, změnil cca 3x. 2x pouze pár detailů a poslední změna byla razantní - přechod do barevného, nejen textového, prostředí.



Obrázek 2.8: Menu webového serveru přijímače Radarcape (zdroj: autorův archiv).

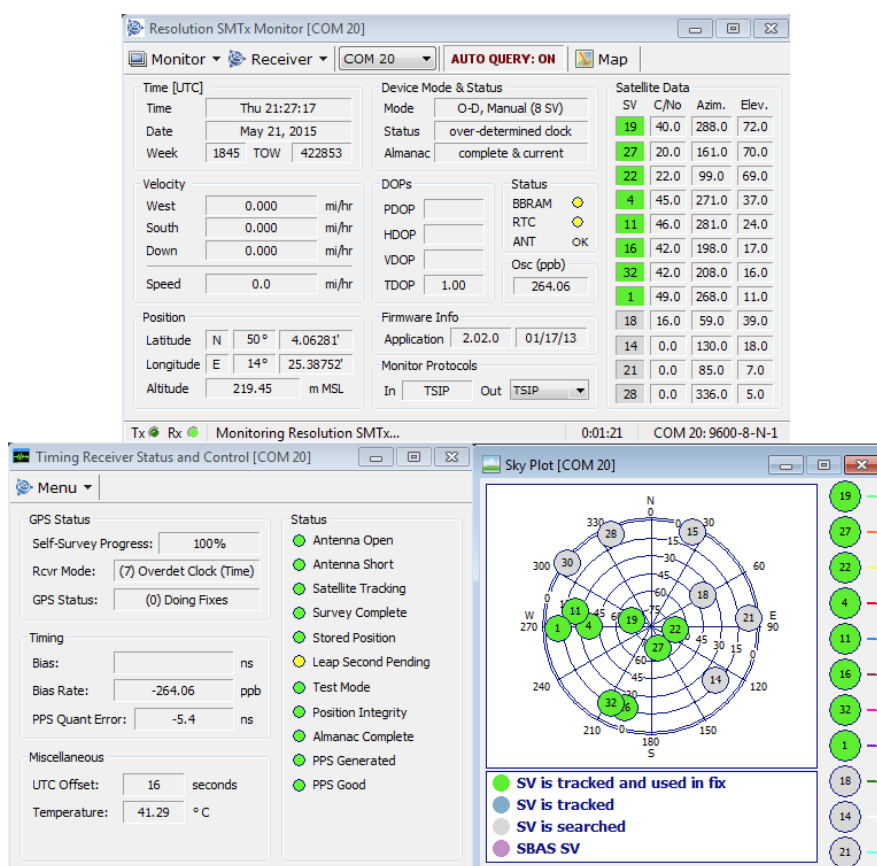
Hlavní menu se skládá ze čtyř nabídek:

- **Aircraft Data** - Zde je možné zobrazit si výstup z přijímače ve formě tabulky s údaji o detekovaných letadlech, 2D zobrazení letadel v Google mapách a KML soubor pro živý 3D náhled v programu Google Earth.
- **Feeder** - Zde jsou možnosti nastavení sdílení dat serverům jako například FlightRadar24. Tuto možnost nepoužíváme.
- **Status** - Jedna z nejdůležitějších přehledových funkcí - zobrazuje se zde stav GPS modulu a stav výstupu z přijímače. Mimo jiné je tu aktuální čas GPS modulu, souřadnice, teplota modulu, detekované satelity, záznamník chyb a další.
- **Configuration** - Zde se provádí hlavní nastavení přijímače a změna hesla pro webový přístup. Kromě dalšího nastavení sdílení jsou zde přesné souřadnice GPS zaměřené modulem, nastavení výstupu z USB, nastavení jednotek, časů vymazání letadel a maximálních vzdáleností, obnovovací frekvence informací na webovém serveru, FPGA nastavení, update databáze letadel a upgrade firmwaru.

2.1.6.2 GPS funkce

Z důvodů potřeby přesné časové značky pro multilaterační výpočet je přijímač osazen precizním GPS modulem Trimble Resolution SMTx. Jedná se o vysoce kvalitní zařízení schopné dodávat přesné časové informace pomocí 1 pulzu za sekundu (PPS), což odpovídá teoretické přesnosti časové synchronizace až na 15 ns. Celková přesnost značkování zpráv je uváděna na 50 ns, což odpovídá přesnosti 15 m. Modul je také schopen odolávat teplotám v intervalu $-40/+85$ °C.

Zajímavou funkcí je možnost sdílení GPS dat po síti a jejich zobrazení pomocí speciálního software přímo od výrobce GPS modulu - Trimble Studio. Zde je mnohem víc informací než poskytuje GPS status, jsou zde podané i graficky a je zde i možnost nastavení modulu, která je však na přijímači zakázaná.



Obrázek 2.9: Presentace GPS dat v programu Trimble Studio (zdroj: autorův archiv).

2.1.6.3 FPGA nastavení přijímače

Pomocí webového serveru se dají nastavit tyto parametry FPGA:

- **Formát datového výstupu** - Binární nebo hexadecimální.
- **Filtr na výstupu zpráv** - Všechny DF nebo pouze DF11, DF17 a DF18.
- **Přítomnost časové značky ve výstupu** - Ano či ne.
- **CRC kontrola zpráv pro DF11, DF17 a DF18** - Ano či ne.
- **Zdroj časové značky** - GPS nebo hardwarové hodiny.
- **FEC korekce pro DF17 a DF18** - Ano či ne.
- **Zpracování zpráv Modu A/C** - Ano či ne.

2.1.6.4 Formát dat na výstupu z přijímače

Všechny přijímače Fakulty dopravní jsou nastaveny na hexadecimální výstup včetně GPS časové značky. Zpráva z přijímače pak vypadá takto:

@02756180A5668D4B843A58BF04741AD4AD407E2D;
= 112 bitů dlouhá Extended squitter zpráva

@02755FA4C4B128001E192BE9BB;
= 56 bitů dlouhá Acquisition (Short) squitter zpráva

V tomto hexadecimálním tvaru je následující posloupnost:

- „@“ značí začátek zprávy.
- Prvních 12 znaků (48 bitů) je zakódovaná časová značka v nanosekundách -
@02756180A5668D4B843A58BF04741AD4AD407E2D;
- Následuje 56/112 bitů dlouhá AS/ES zpráva -
@02756180A5668D4B843A58BF04741AD4AD407E2D;
- „;“ značí konec zprávy

Pro překlad časové značky je třeba převést ji do binárního formátu:

02756180A566 = hexadecimálně

0000 0010 0111 0101 0110 0001 1000 0000 1010 0101 0110 0110 = binárně

0000 0010 0111 0101 01 = Prvních 18 bitů značí počet sekund od půlnoci.

10 0001 1000 0000 1010 0101 0110 0110 = Zbýlých 30 = počet nanosekund.

Překladem z binární soustavy do decimální získáme tyto hodnoty:

Počet sekund od půlnoci = 2517

Počet nanosekund = 562079078

2517 = 47 minut a 57 sekund po půlnoci

Výsledný čas příjmu je: 00:47:57,562079078 UTC nebo GPS, v závislosti na nastavení přijímače. Je třeba brát na vědomí, že GPS čas = UTC + 16s, je tedy o 16s napřed vůči UTC času.

2.1.7 Závěrečné hodnocení přijímacích zařízení

Vzhledem k dostupným informacím si troufám tvrdit, že ADS-B přijímač Radarscape byl vhodně zakoupen pro využití v multilateračním systému a od doby nákupu prvního přijímače se neobjevila žádná konkurence pro tento přístroj. Existují samozřejmě SDR přijímače, jejichž využití by se stalo velmi zajímavým, pokud by se dala zjistit časová prodleva mezi příchodem zprávy na přijímací anténu a dekodováním/označením zprávy časovou značkou, následně by se tato prodleva dala kompenzovat a SDR zařízení by se stala velmi zajímavými low-cost alternativami přijímače Radarscape. Tato prodleva je ale zatím neměřitelná a proto je přijímač Radarscape jasnou volbou pro low-cost MLAT systémy.

2.2 Hardware pro pozemní přijímací stanici

Multilaterační systém se dá popsat jako tříprvkový systém. Prvním prvkem jsou přijímací zařízení, druhým distribuce dat a třetím samotné výpočetní centrum. Tato kapitola se věnuje zařízením potřebným pro fungování pozemních přijímacích stanic, tedy prvnímú prvku systému. Ceny boxů jsou závislé na materiálu a odolnosti od stovek Kč do několika tisíc Kč.

2.2.1 Zapouzdření přijímacího zařízení

Před návrhem boxu pro zapouzdření přijímače je třeba si rozmyslet/zjistit, kde bude tento box umístěn. Existují 4 možnosti umístění:

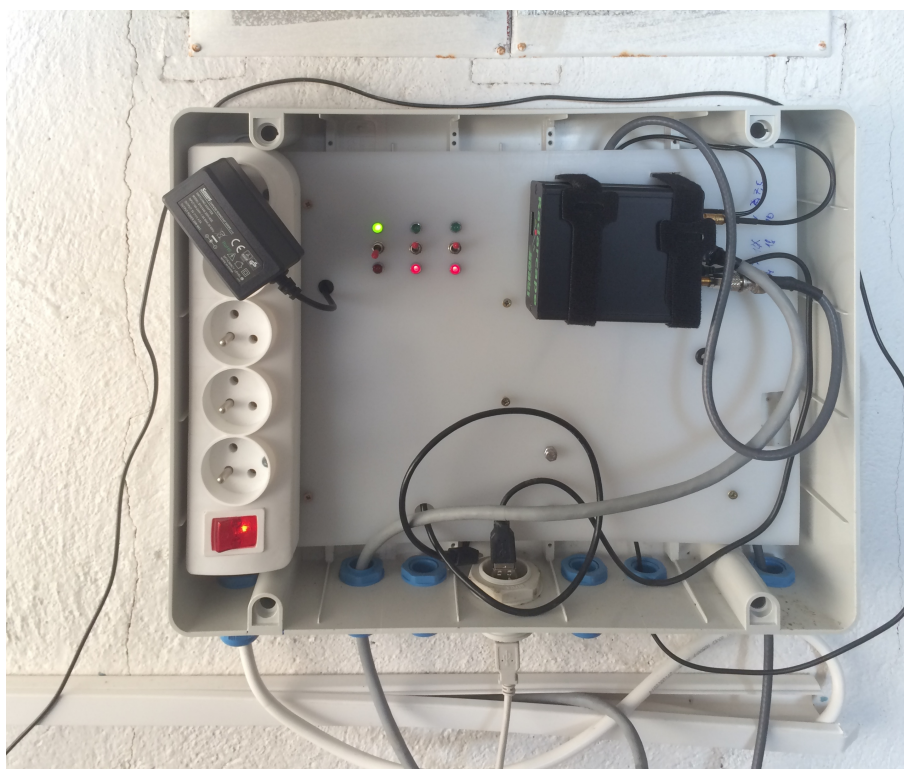
- Vnitřní umístění - volně.
- Vnitřní umístění - na zdi.
- Vnější umístění - na zdi.
- Vnější umístění - na stožáru.

2.2.1.1 Vnitřní umístění - volně

Tato situace obvykle nastává, pokud je přijímač umístěn do obytných nebo průmyslových místností. Nepočítá se zde s možným vniknutím vody ani s vlivem klimatických podmínek. Napájení se zde obvykle řeší přímo ze zásuvky 230 V, případně prodlužovacím kabelem. Přijímač je zde umístěn na stabilním místě, v případě prašného prostředí v menší krabici.

2.2.1.2 Vnitřní umístění - na zdi

V případě umístění do střešních prostor může nastat situace, kdy lze umístit přijímací stanici například do strojovny výtahu. Pro tyto potřeby je obvykle nejvhodnější pevné umístění na zeď z důvodů nejmenšího narušení přítomných zařízení. Ponechávat zařízení ležet na zemi nebo viset na kabelu je značně nevhodné, z důvodu výskytu jiných servisních pracovníků. Pro tento typ umístění je vhodná jakákoli zavírací nástěnná krabice nebo rozvaděčová skříň (ta je vhodná i pro umístění dalších zařízení). V těchto místech se taktéž nepočítá s vniknutím vody do zařízení, proto není třeba zařízení s vyšším stupněm krytí. Viz obrázek 2.10.



Obrázek 2.10: Přijímací stanice Fakulty dopravní umístěná na Strahovských kolejích (zdroj: autorův archiv).

2.2.1.3 Vnější umístění - na zdi

Zde je návrh zapouzdření již složitější. Musí se brát v úvahu vliv meteorologických podmínek a slunečních paprsků. Vliv UV záření je možné vyřešit volbou materiálu boxu. Kromě UV záření má slunce také schopnost značně zahřívat povrch tmavých těles, proto se volí barva nejlépe lesklá bílá nebo se zařízení umístí na stěnu, kam nedopadají přímé sluneční paprsky. V případě meteorologických podmínek je třeba, aby box byl schopen odolat bouřkám a sněhovým vánicím. Pro tyto potřeby se volí krabice se zvýšeným stupněm krytí IP. Obvykle venkovní instalační boxy disponují stupněm krytí IP56 nebo IP65, což v případě IP56 znamená částečnou ochranu proti vniknutí prachu a ochranu proti vlnobití. IP65 znamená úplnou ochranu proti vniknutí prachu a ochranu proti tryskající vodě. Takovéto kompletně uzavřené boxy mají i jednu nevýhodu, na kterou se musí brát ohled - možnou kondenzaci vody uvnitř. V případě, že se krabice uzavře za klimatických

podmínek, kdy je vysoká vlhkost vzduchu, následně bude odolávat velkému rozdílu teplot uvnitř boxu (kde je prostor zahříván elektronickými zařízeními vydávajícími teplo) a vně boxu, může dojít ke kondenzaci vlhkého vzduchu uvnitř boxu a k následnému zkratování vnitřních zařízení. Z tohoto důvodu je možné použít ne úplně utěsněné boxy, u kterých se bude počítat s možnou kondenzací na vnitřní straně boxu a s následným odvodem vody ve spodní části boxu. Je zde ale potřeba částečné ochrany vnitřních zařízení před kondenzátem.

Napájení se v tomto typu umístění řeší obvykle vyvedením napájecí sítě do krycího boxu, kde se rozvede individuálně napájení k požadovaným zařízením.

2.2.1.4 Vnější umístění - na stožáru

Takto obvykle fungují profesionální multilaterační systémy. Podmínky jsou zde stejné jako při vnějším umístění na zeď s tím rozdílem, že stožár má určitou maximální nosnost a rozměry krabice na stožáru jsou také omezené. Box také musí být k samotné instalaci na stožár uzpůsoben.



Obrázek 2.11: Profesionální přijímací stanice WAM systému společnosti ERA a.s., umístěná v Kapském Městě (převzato z [6]).

2.2.2 Napájení pozemní stanice

Důležitým prvkem MLAT systémů je jejich napájení, které se dá řešit několika způsoby. Samotný přijímač je konstruován pro využití adaptéru, který přeměňuje střídavé napětí 230 V ze sítě na stejnosměrné 5 V. Již samotná koncepce 5 V zařízení je vhodná, protože existuje velké množství 5 V napájecího příslušenství. Využití dodávaného adaptéru má smysl pouze v případě, kdy v boxu potřebujeme mít k dispozici napětí 230 V pro další přístroje nebo pokud zařízení funguje bez boxu. Pokud by však měl být koaxiální kabel od přijímací antény značně dlouhý, bude docházet ke ztrátám díky vzdálenosti kabelu a to způsobí omezení kvality přijímaného signálu. V takovýchto případech je vhodné zvážit přiblížení přijímače k přijímací anténě - například do boxu na stožár. K němu je následně třeba přivést jak napájení, tak připojení k síti pomocí Ethernet kabelu, což znamená minimálně 2 kabely. Tento počet 2 kabelů se dá pomocí moderních technologií redukovat na jeden, případně i žádný kabel vedoucí do přijímací stanice. Napájení se dá řešit následujícími způsoby:

- Klasický přívod sítě 230 V do boxu + Ethernet kabel.
- Napájení zařízení pomocí Ethernet kabelu - Power over Ethernet.
- Napájení z bateriového zdroje pro jednorázový sběr dat.
- Napájení ze solárního článku se záložní baterií.

2.2.2.1 Power over Ethernet - POE

Tato technologie využívá klasických Ethernet kabelů s osmi vnitřními kabely, které se normálně využívají pro přenos dat ze síťové infrastruktury rychlostními standardy 10Base-T, 100Base-TX a 1000Base-T. Pomocí technologie POE je osmi-žilový Ethernet kabel schopen poskytnout 2 rychlostní standardy - 10Base-T a 100Base-TX. 1000Base-T používá všech 8 žil v kabelu a nenechává žádné volné místo pro distribuci napětí, proto ho nelze využít. V případě dvou pomalejších standardů se pro přenos dat kabelem využije polovina kabelů, tedy 4. Pomocí zbylých 4 kabelů se šíří stejnosměrné napětí vždy po 2 kabelech pro kladnou větev a 2 pro zápornou. 2 standardní žíly Ethernet kabelů jsou schopny přenést až 360 mA při 50 V, což umožňuje okamžitý příkon až 18 W na jednu dvojlinku. Vzhledem k dispozici 4 žil pro přenos napětí, je možné napájet zařízení o celkovém příkonu až 36 W. Samotný přijímač Radarcap má měřený příkon 4 W, takže

je zde ještě prostor pro napájení periferních zařízení, jako jsou zesilovače a jiná zařízení.

Existují 2 druhy POE:

- **Pasivní** - Využívá dvojice dvojlinek pro přenos konkrétního napětí, které je k dispozici na vstupu. Adaptér na vstupu je libovolný v závislosti na požadovaném napětí.
- **Aktivní** - Je schopné detekovat potřebné napětí a zvolit správnou hodnotu. Zde je třeba speciální hardware jak na vstupu, tak i na výstupu.

Aktivní POE jsou vhodné při zavádění síťové infrastruktury a pro napájení zařízení, které jsou s tímto standardem kompatibilní.

Pasivní POE má výhodu jednoduchosti - napětí, které se do kabelu vloží, se z něj na konci kabelu také vyjme a z kabelu se na konci opět stává kabel pomalejších standardů bez napájení, které se z kabelu vyjme a pokračuje pomocí napájecího kabelu s požadovaným konektorem. Součástí POE přenosu napětí jsou vždy 2 zařízení. Na vstupu je vždy buď napájecí switch nebo POE injektor a na výstupu je buď POE splitter nebo samotné napájené zařízení. POE injektor je jednoduché zařízení, které funguje jako most pro datové kabely, ale disponuje konektorem pro připojení zdroje napětí, které je následně šířeno volnými kabely na výstupu. POE splitter je zařízení opačné - napětí ze síťového kabelu vyvede ven a výstupem je napájecí konektor a Ethernet kabel. Obě tato zařízení se dají levně sestavit ze spojek Ethernet kabelů. Ceny těchto zařízení se pohybují v řádu stokorun do cca 1000 Kč.



Obrázek 2.12: Vlevo injektor a splitter pasivního POE systému (AirLive Passive PoE Kit) a vpravo aktivní POE systém (AirLive POE-100AF) (převzato z [15]).

2.2.2.2 Jednorázový bateriový zdroj

Díky standardnímu 5 V napětí je možné přijímač napájet pomocí Powerbanky. Jedná se o přenosné zařízení o standardní kapacitě kolem 10 Ah/5 V a konektory USB. Nejčastěji se takovéto zařízení používá pro napájení mobilních telefonů a tabletů v místech, kde není k dispozici jiný zdroj. Obvykle mají tato zařízení 2 maximální hodnoty výstupního proudu: 2,1 A a 1 A. Přijímač Radarcape reálně využívá 0,8 A, takže teoreticky by mu stačil výstup 1 A, ale z preventivních důvodů doporučuji využít 2,1 A zařízení. V případě zaokrouhlení hodnoty využívaného proudu na 1 A je powerbanka s kapacitou 10 Ah schopna napájet jeden přijímač teoreticky po dobu 10 hodin. Tato možnost je nejuniverzálnější, ne však jediná. Samozřejmě je možné pro napájení použít jakoukoli 12 V baterii, v tomto případě je však nutné použít DC-DC měnič z 12 V na 5 V.



Obrázek 2.13: Powerbanka ADATA PV110 s kapacitou 10400 mAh (převzato z [1]).

2.2.2.3 Solární napájení s akumulátorovou zálohou

Tato metoda napájení je vhodná pro umístění přijímacích stanic na stabilních místech, kde není možné nebo je složité přivést napájení kabelově. V případě využití v kombinaci s bezdrátovým přenosem dat vznikne plně autonomní přijímací stanice nezávislá na okolních podmínkách.

Tzv. „Ostrovní systém“ je zařízení schopné zásobovat připojená zařízení proudem i v místech, kde by to jinak nebylo možné, proto název ostrovní. Obvykle se skládá ze čtyř hlavních zařízení:

- **Fotovoltaický článek** převádějí energii ze slunce na elektrickou energii pomocí fotovoltaického efektu. Hlavním parametrem panelu je jeho špičkový výkon, což je hodnota udávající maximální hodnotu elektrické energie, kterou je panel schopen přeměnit ze solární.
- **Solární regulátor** je zařízení vložené mezi baterií a solárním panelem. Jeho hlavní funkcí je stabilizovat napětí z panelu, kterým nabíjí připojený akumulátor a zároveň napájí spotřebiče na výstupu.
- **Dobíjecí akumulátor** funguje jako záloha pro případ, kdy je solárním panelem vyrobeno méně energie než je potřeba pro funkci spotřebiče - v tomto případě akumulátor „pomáhá“ solárnímu panelu. Pak jsou případy, kdy se výkon solárního panelu blíží minimu (v noci nebo za husté oblačnosti) a tehdy akumulátor funguje jako zdroj napětí pro připojené spotřebiče.
- **Měnič napětí** je volitelné příslušenství. V případě, že má ostrovní systém jiné výstupní napětí než je vstupní napětí spotřebiče, využije se měnič napětí.

Návrh ostrovního systému pro MLAT stanici s přijímačem Radarcape:

Nejdříve je třeba stanovit celkovou spotřebu vnitřních zařízení MLAT přijímací stanice. Pro teoretický návrh uvažují tato zařízení:

- **Přijímač Radarcape** - $5\text{ W} = 120\text{ Wh/den}$
- **Wi-Fi anténa s funkcí klient a dosahem až 30 km** - $6\text{ W} = 144\text{ Wh/den}$
- **Raspberry Pi pro experimentální účely** - $5\text{ W} = 120\text{ Wh/den}$

Celkem se tedy dostáváme na potřebných 384 Wh za den. V ostrovních systémech se obvykle počítá se 14% ztrátou energie (kabely, panely atd.). Denní spotřebu tedy vynásobíme číslem 1,14 a dostaneme 438 Wh.

Za bod umístění systému stanovíme střechu jedné z budov Strahovských kolejí. Solární panel bude nasměrován přesně na jih s vertikálním natočením 60° . Nyní je třeba zjistit intenzitu slunečního záření v konkrétním místě v konkrétním ročním období, pro což využijeme systém PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu>). Pro výpočet nejnižších hodnot výkonu solárních panelů se používá měsíc leden, kdy průměrně Slunce vyjde v 08:07 ráno a zapadne v 16:07 večer. Po zadání souřadnic a konfigurace systému vyjdou hodnoty v tabulce 2.1.

G = obvyklá intenzita světla [W/m^2]

G_d = intenzita rozptýleného světla [W/m^2]

G_c = intenzita přímého světla [W/m^2]

Tabulka 2.1: Hodnoty intenzity světla (v lednu) na Strahově (převzato z [7]).

Čas	G	G_d	G_c
8:07	51	25	200
8:22	71	34	287
8:37	91	43	378
8:52	107	49	453
9:07	122	54	522
9:22	136	59	586
9:37	148	64	644
9:52	159	67	697
10:07	169	70	744
10:22	178	73	785
10:37	185	76	821
10:52	192	78	851
11:07	197	79	875
11:22	200	80	893
11:37	203	81	905
11:52	204	81	911

Čas	G	G_d	G_c
12:07	204	81	911
12:22	203	81	905
12:37	200	80	893
12:52	197	79	875
13:07	192	78	851
13:22	185	76	821
13:37	178	73	785
13:52	169	70	744
14:07	159	67	697
14:22	148	64	644
14:37	136	59	586
14:52	122	54	522
15:07	107	49	453
15:22	91	43	378
15:37	71	34	287
15:52	19	18	13
16:07	13	12	9

Výpočet zjednoduším předpokladem, že solární panel bude nasměrován tak, že na něj bude svítit slunce po celý den. V situaci, kdy by nesvítilo slunce přímo, sčítaly by se hodnoty časů s přímým svitem s hodnotami rozptýleného světla.

2.2. Hardware pro pozemní přijímací stanici

Celková denní energetická intenzita světla je v požadovaném místě po sečtení 4807 [W/m^2].

Nyní je třeba zvolit výkon fotovoltaického panelu - zvolím 3 konkrétní panely s výkonem 15 W, 20 W a 30 W. Jedná se o panely NETC-M15, NETC-M20 a NETC-M30 vyráběné společností NETC. Parametry panelů viz tabulka 6.1.

Tabulka 2.2: Parametry panelů NETC (převzato z [5]).

Typ	Maximální výkon [W]	Plocha panelu (PP) [m^2]	Cena [Kč]
NETC-M15	15	0,1334	1407
NETC-M20	20	0,1856	1873
NETC-M30	30	0,243	2741

Nyní vynásobím hodnoty v tabulce 2.1, sloupci G plochou panelu abych získal maximální možnou intenzitu světla na ploše konkrétního panelu. Tyto hodnoty následně porovnám s maximálním výkonem panelu, a pokud jsou vyšší, počítám pouze s maximálním výkonem panelu, viz tabulka 2.3 pro panel NETC-M15. Pro ostatní je výpočet analogický.

G = obvyklá intenzita světla na $1m^2$ v [W/m^2]

$G * PP$ = obvyklá intenzita světla na plochu panelu $0,1334m^2$ v [W/m^2]

P_{mpp} = hodnota výkonu panelu [W]

Tabulka 2.3: Hodnoty obvyklé intenzity světla dopadajícího na plochu panelu NETC-M15.

Čas	G na $1m^2$	G * PP	P_{mpp}
8:07	51	6,8034	6,8034
8:22	71	9,4714	9,4714
8:37	91	12,1394	12,1394
8:52	107	14,2738	14,2738
9:07	122	16,2748	15
9:22	136	18,1424	15
9:37	148	19,7432	15
9:52	159	21,2106	15
10:07	169	22,5446	15
10:22	178	23,7452	15
10:37	185	24,679	15
10:52	192	25,6128	15
11:07	197	26,2798	15
11:22	200	26,68	15
11:37	203	27,0802	15
11:52	204	27,2136	15

Čas	G na $1m^2$	G * PP	P_{mpp}
12:07	204	27,2136	15
12:22	203	27,0802	15
12:37	200	26,68	15
12:52	197	26,2798	15
13:07	192	25,6128	15
13:22	185	24,679	15
13:37	178	23,7452	15
13:52	169	22,5446	15
14:07	159	21,2106	15
14:22	148	19,7432	15
14:37	136	18,1424	15
14:52	122	16,2748	15
15:07	107	14,2738	14,2738
15:22	91	12,1394	12,1394
15:37	71	9,4714	9,4714
15:52	19	2,5346	2,5346
16:07	13	1,7342	1,7342

Výpočtem tedy získávám, pro zvolené panely, hodnoty v tabulce 2.4. Ty pak porovnám s vypočítanou spotřebou na den - 438 Wh. V poměru ceny k

Tabulka 2.4: Denní výkonové hodnoty zvolených panelů NETC.

Typ	Denně získaná energie [Wh]	Cena/výkon
NETC-M15	442,8414	3,177
NETC-M20	595,2576	3,146
NETC-M30	870,195	3,1498

výkonu je nejlepší panel s výkonem 15 W s indexem 3,177, z preventivních důvodů však volíme panel **NETC-M20**, jež díky své ploše a výkonu dosahuje o 35% vyššího výkonu než je třeba a 15 W panel by byl naddimenzován pouze o méně jak 1%.

Nyní je třeba zvolit solární regulátor podle výkonu zvoleného fotovoltaického panelu. V našem případě není třeba nic řešit, jelikož regulátory se obvykle výkonem pohybují nad 100 W. My volíme CARSPA C1210 12 V/10 A s výkonem 120 W za cenu 460 Kč, který plně postačí pro naše potřeby.

Dalším prvkem systému je akumulátor. Není zde složitý výběr - nejdůležitější prvky jsou napětí a kapacita. Hlavní omezující vlastností akumulátoru je jeho stoupající hmotnost se stoupající kapacitou. Pro náš systém volíme akumulátor, který vydrží minimálně 24 hodin. Nejbližší se našim požadavkům blíží akumulátor od společnosti MHB battery - MNG40-12 s kapacitou 480 Wh za cenu 2350 Kč, vážící 13,2 Kg.

Posledním zařízením je měnič napětí, který budeme potřebovat pro napájení přijímače a RaspberryPi, jež potřebují napětí 5V, ale náš systém pracuje s 12 V. Nyní existují 2 cesty, které se liší hlavně prostorovými požadavky. První variantou je pořídit měnič 12 V/230 V, který je větší a bude k němu potřeba multi-zásuvka pro napájení více zařízení, což znamená další prostor pro ni a adaptéry do ní zapojené. Cenově tato možnost vychází na cca 600 Kč + zásuvky. Druhou variantou je měnič napětí 12 V/5 V, SD-15A-5 od firmy Mean Well, který má maximální výkon 15 W, což pro naše potřeby postačuje a jeho cena je 400 Kč. Výsledná volba závisí na prostorových možnostech a univerzálnosti zařízení.

Další náklady, zahrnující hlavně kabeláž a montážní prvky, počítejme na 3000 Kč. Předpokládaná cena ostrovního systému pro MLAT stanici je **7683 Kč**. Jedná se pouze o cenu za nejnútnejší zařízení, není zde zahrnuta cena za větší box pro stanici nebo jiné položky, které budou ostrovním systémem ovlivněny.

2.2. Hardware pro pozemní přijímací stanici

Pokud budeme počítat návratnost v porovnání s bezztrátovým napájením ze sítě, které vyjde na 690 Kč za rok při ceně elektřiny 4,92 (průměrná cena za kWh v roce 2014), **vrátí se nám tato investice za 11 let a 50 dní non-stop provozu** (pokud by vydržela baterie).



Obrázek 2.14: Vybrané prvky ostrovního systému. Vlevo fotovoltaický panel, uprostřed nahoře solární regulátor, uprostřed dole měnič napětí a vpravo olověný akumulátor (převzato z [5]).



Obrázek 2.15: Příklad profesionální MLAT stanice od společnosti ERA a.s. na Novém Zélandu, napájené fotovoltaickými panely (převzato z [3]).

2.2.3 Datový přenos mezi MLAT stanicí a výpočetním střediskem

Stejně jako v případě všech ostatních částí MLAT systému, je i zde třeba klást důraz na co nejnižší časovou prodlevu při přenosu dat. Přenos dat mezi pozemní přijímací stanicí a výpočetním centrem bývá obvykle druhým nejdelším spojem v MLAT systému. Jako nejdelší považujeme spoj letadlo <-> přijímací anténa, který může být dlouhý až několik stovek km, což je prodleva v řádu stovek μs , k tomu připočtíme prodlevu zpracování na přijímači a dostáváme se k prodlevě na datovém spoji. Vzhledem k tomu, že rychlost přenosu mezi letadlem a anténou nejsme schopni ovlivnit, stejně jako rychlost zpracování přijímačem, která je u profesionálních přijímačů daná, je časová prodleva datového spoje první prodlevou, kterou můžeme při návrhu spoje ovlivnit. Jako příklady formy přenosu dat uvedu následující 3 možnosti:

- Implementace do klasické Ethernet infrastruktury
- Optická vlákna
- Bezdrátový přenos

2.2.3.1 Implementace do klasické Ethernet infrastruktury

Tato možnost je vhodná převážně pro vědecké a nekritické aplikace z důvodu vyšší časové prodlevy distribuce dat. To je způsobeno dvěma faktory. Prvním je rychlost šíření datového signálu pomocí Ethernet kabelu, která je charakterizována hodnotou NVP (Nominal Velocity of Propagation) a jedná se o poměr rychlosti šíření signálu v kabelu k rychlosti šíření světla s výsledkem v %. Obvykle tato hodnota dosahuje 68%, tedy zhruba 2/3 rychlosti šíření světla. Druhým faktorem je zpoždění na data-zpracujících zařízeních spojujících cestu Ethernet kabely.

Součtem těchto hodnot získáme reálné zpoždění síťové infrastruktury, které předvedu na následujícím měření pomocí trasování síťové infrastruktury v příkazovém řádku Windows:

Příkazem „tracert x.x.x.x“, kde x.x.x.x je IP adresa nebo DNS název přijímače spustím trasování.

Měření jsem provedl 40x a zjistil jsem, že mezi přijímačem a serverem v laboratoři ATM systémů v budově Horská je 7 síťových uzlů, což znamená 8 časových hodnot, které jsou uvedeny v tabulce 2.5, počínaje zpožděním mezi serverem a 1. uzlem a konče zpožděním mezi 7. uzlem a přijímačem.

Tabulka 2.5: Hodnoty zpoždění síťových uzlů mezi severem v ATM laboratoři a ADS-B přijímačem na Pankráci.

Interval uzlu	Hodnota zpoždění [ms]
1	3
2	1
3	1
4	6
5	5
6	7
7	7
8	7
Součet:	37

Každá zpráva vyslaná přijímačem do sítě internet tedy dorazí na centrální server průměrně o **37 ms později**. Tato prodleva se samozřejmě liší v závislosti na počtu uzlů a vzdálenosti kabelu mezi nimi.

2.2.3.2 Optická vlákna

Tato technologie se používá převážně v profesionálních systémech díky svému nízkému zpoždění. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady spojené nejen s technologií přenosu, ale i s nutností upravit místní infrastrukturu, uložit kabely do země, což je hlavní nevýhodou této technologie a omezuje její využití. Optická vlákna se používají dvěma způsoby:

- Point to point
- Point to wireless

„Point to point“ znamená připojení z výchozí destinace do cílové. Obvykle je výchozí destinací pozemní MLAT stanice a cílovou výpočetní server. Připojení optické soustavy do sítě Ethernet kabelů sice popírá její účel, je však proveditelné.

„Point to wireless“ znamená přiblížení pomocí optického vlákna, zbylá část spoje je ale řešena bezdrátově.

Rychlost šíření signálu v optickém kabelu se blíží rychlosti světla a zbylá prodleva záleží na zvoleném zařízení. Obecně však platí, že takovéto optické spoje jsou rychlejší než Ethernet.

2.2.3.3 Bezdrátový přenos

Pro tento typ přenosu dat se nejčastěji používají směrové spoje od pozemní stanice přímo k výpočetnímu centru, respektive k jeho přijímací anténě. Výhodou je naprostá flexibilita spoje v případě přímé viditelnosti mezi zdrojem a cílem.

Pro bezdrátový přenos se obvykle používají pásma vyšší než 5 GHz kvůli nižšímu zarušení. Profesionální systémy používají například přenos pomocí systému Motorola Canopy. Jedná se o bezdrátové spoje na frekvenci 5,725 až 5,825 GHz. Reálný dosah při přímé viditelnosti je od 500 m do 250 km v případě spoje point-to-point až do 190 km v případě point-to-multipoint. Výhodou tohoto systému je také možnost časové synchronizace uzlů pomocí GPS, čehož se využívá i pro časovou synchronizaci v MLAT systémech, například v MLAT systému letiště Káhira. Cena takového systému se pohybuje v řádu desítek tisíc Kč.



Obrázek 2.16: Systém bezdrátového spoje Motorola Canopy (převzato z [5]).

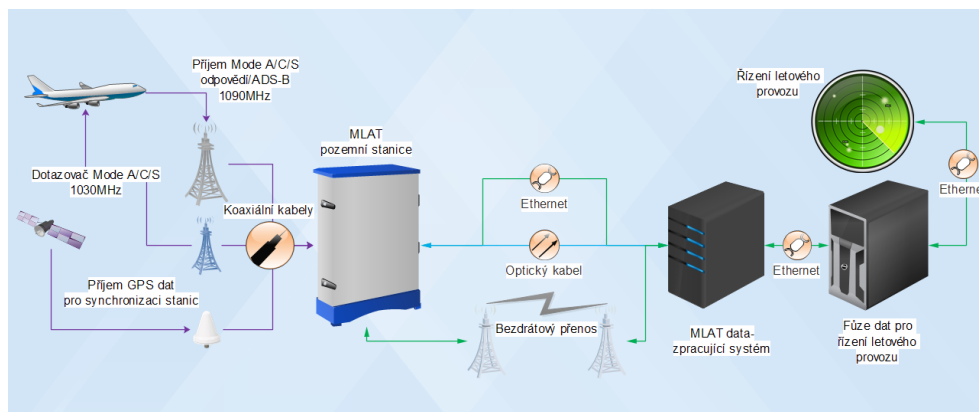
V případě nekritické aplikace MLAT systému je možné využít běžná Wi-Fi pásma a získat tak levnější a flexibilní bezdrátové spoje.

Návrh architektury nízkonákladového MLAT systému

Tuto kapitolu rozdělím na 2 části - hardwarovou a softwarovou. V obou částech zachytím architekturu multilateračních systémů, popíši jejich prvky a vše prezentuji vhodnými schémata.

3.1 Hardwarová architektura systému

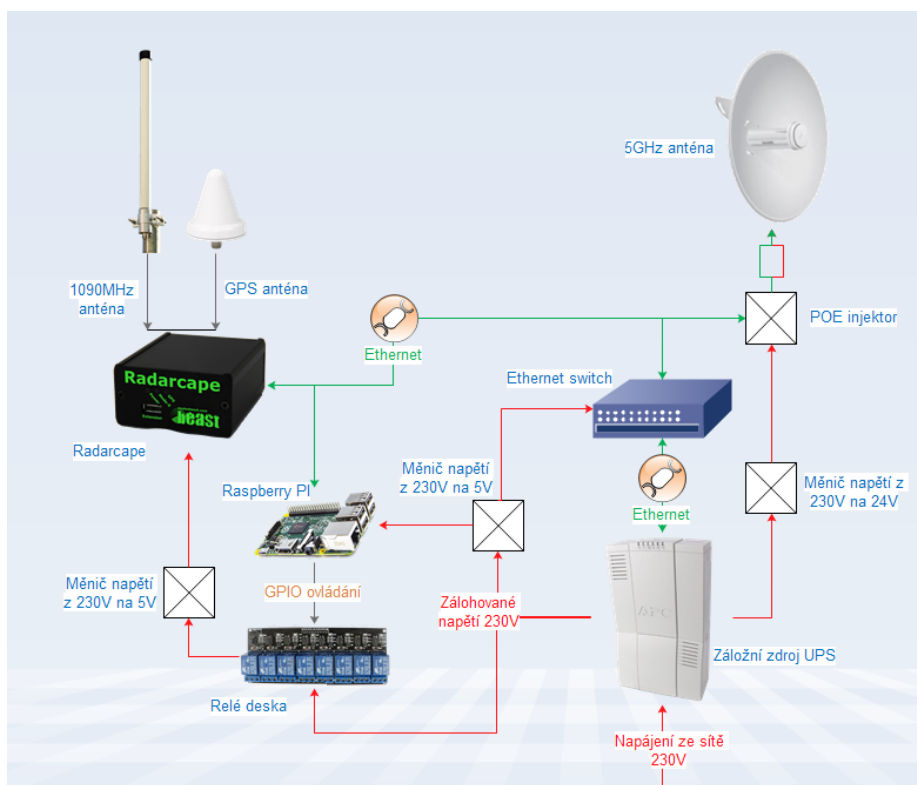
Základní, velmi zjednodušená architektura obecného MLAT systému:



Obrázek 3.1: Základní struktura obecného MLAT systému.

3.1. Hardwarová architektura systému

Nyní přiblížím architekturu navrhované přijímací stanice (viz obrázek 3.2) a následně i kalkulaci (viz tabulka 3.1) této konfigurace:



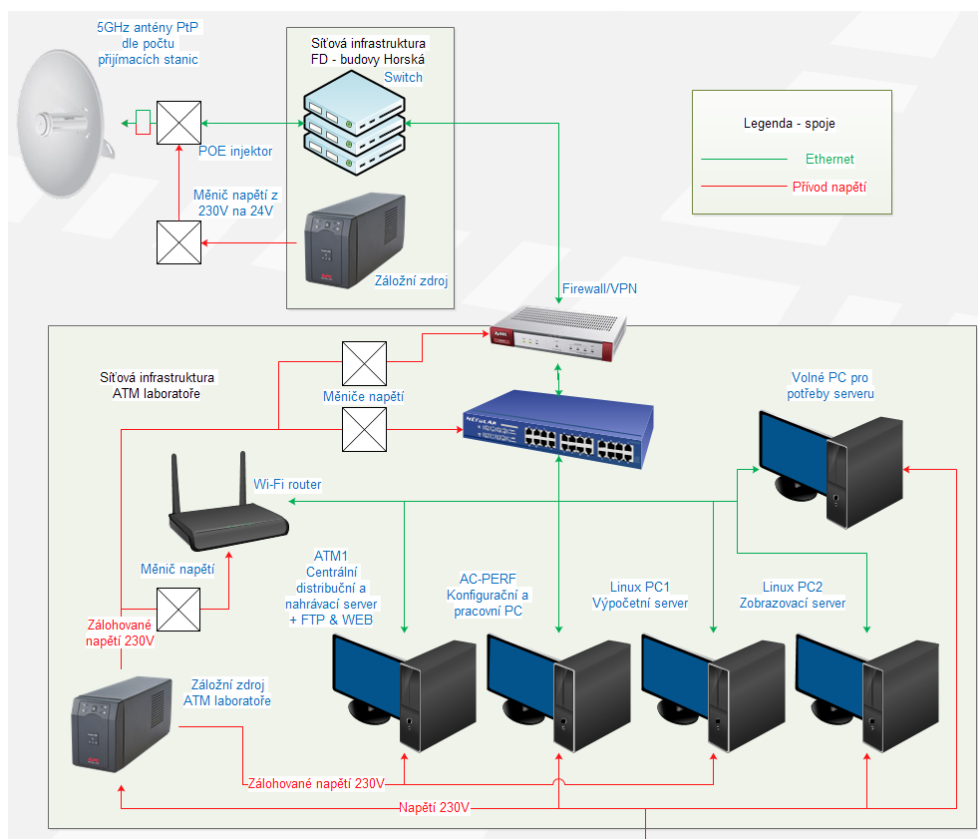
Obrázek 3.2: Vnitřní struktura pozemní přijímací stanice

Tabulka 3.1: Zařízení použitá pro pozemní stanici + cenová kalkulace.

Produkt	Cena [Kč]
Radarcape + GPS a 1090MHz anténa + adaptér	19.500
RaspberryPi2 + adaptér	1.600
Relé deska	350
Switch D-Link DGS-105/E	600
UBNT Powerbeam M5 včetně injektoru	2.400
APC Back-UPS HS 500VA	3.500
Stožár + spojovací materiál	1.000
Kabely a další příslušenství	2.000
Zapouzdření	2.000
Součet:	32.950

3.1. Hardwarová architektura systému

Nyní popíši navrhovanou architekturu MLAT systému v laboratoři ATM systémů Fakulty dopravní v budově Horská:



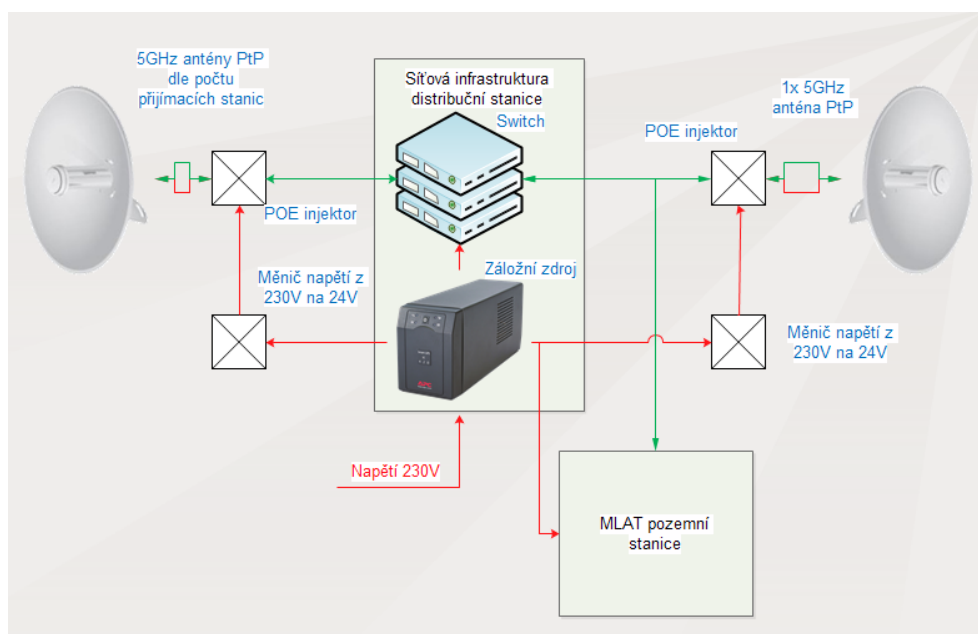
Obrázek 3.3: Navrhovaná architektura systémů v laboratoři ATM systémů pro jeho využití jako centra MLAT systému.

Na schématu je zobrazena architektura systémů v laboratoři ATM systémů současně s novými navrhovanými zařízeními. Popis obrázku 3.3: V případě, že bude centrálním přijímacím střediskem budova Horská, bude na její střeše umístěn stožár s počtem antén rovným počtu přijímacích pozemních stanic. Systém bezdrátového přenosu bude tedy fungovat jako PtP. Antény budou propojeny se zálohovanou sítovou infrastrukturou budovy Horská, pomocí které bude provedeno spojení s ATM laboratoří. Na vstupu do ATM laboratoře bude umístěn firewall včetně VPN serveru z důvodu vyšší bezpečnosti a možného zabezpečeného připojení uživatelů do místní sítě odkudkoli. Kvalitní firewall stojí kolem 6.000 Kč, v případě integrovaného Wi-Fi přístupového bodu cca 9.000 Kč. Následuje switch, který

3.1. Hardwarová architektura systému

připojuje do lokální sítě všechna PC + Wi-Fi router pro práci studentů v laboratoři. Jako další nové zařízení je zde uveden akumulátorový záložní zdroj, který se stává nutností pro výpočetní servery v případě práce 24/7, z důvodu eliminace výpadků energie, ke kterým zde dochází. Cena takového záložního zdroje se pohybuje od 10.000 Kč výš. Novinkou ve schématu je využití jednoho z volných PC, které jsou nyní k dispozici v laboratoři, pro účely webového, ftp nebo jiného serveru.

V případě, že centrum bezdrátových spojů bude v jiné lokalitě než na budově, ve které jsou umístěny servery, bude mít architektura takového redistribučního centra následující podobu:



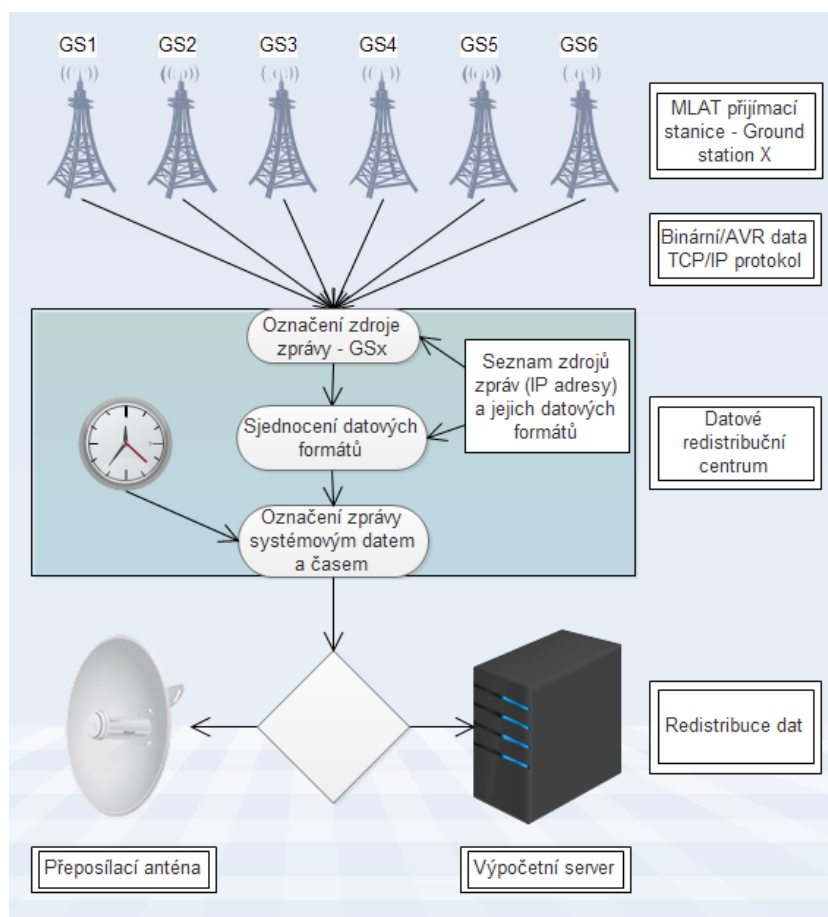
Obrázek 3.4: Architektura centrální redistribuční stanice

3.2 Softwarová architektura systému

3.2.1 Softwarové procesy na úrovni centrální redistribuční stanice

První data-zpracující software se objevuje již na úrovni centrální redistribuční stanice pro sjednocení datových toků z pozemních přijímacích stanic. Vzhledem k návrhu „low-cost“ multilateračního systému počítám i s možností, že se na trhu objeví i jiné vhodné přijímače. Ty mohou mít jiné výstupní formáty, a proto jsem do systému navrhl modul, jenž bude sjednocovat formát přijímaných dat do jedné standardní podoby.

Popis softwarových procesů v datovém redistribučním centru je znázorněn na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Softwarová úprava dat v Datovém redistribučním centru.

Každá zpráva se zde označí číslem přijímače ze seznamu podle IP adresy, odkud zpráva přišla. V následujícím kroku se podle čísla zdroje zjistí ze seznamu, jaký je jeho datový formát a následně se tento upraví na jednotný formát používaný v celém MLAT systému, čímž se zajistí kompatibilita různých přijímačů s celým systémem. Pokud centrálním formátem zvolíme hexadecimální, bude přijatá zpráva nyní vypadat takto:

„;XX;@0275794C08D8A003314834A2CA052C5E4E13728A;“, kde *XX* znamená dvouznakový hexadecimální kód přijímací stanice. Díky využití dvou znaků jsme schopni značkovat zprávu až z 256 zdrojů. Je možné použít jen jeden znak, ale zmenší se tím maximální počet zdrojů na 16. Pokud hexadecimální dvojice *00* a *FF* budeme považovat za testovací, můžeme první přijímací stanici označit číslem 1 a hexadecimální dvojicí *01*, což v binární soustavě znamená „0 0 0 0 0 0 1“. Pokud dosáhneme počtu 15 přijímacích stanic (*0F*), následuje dvojice *10* znamenající číslo 16.

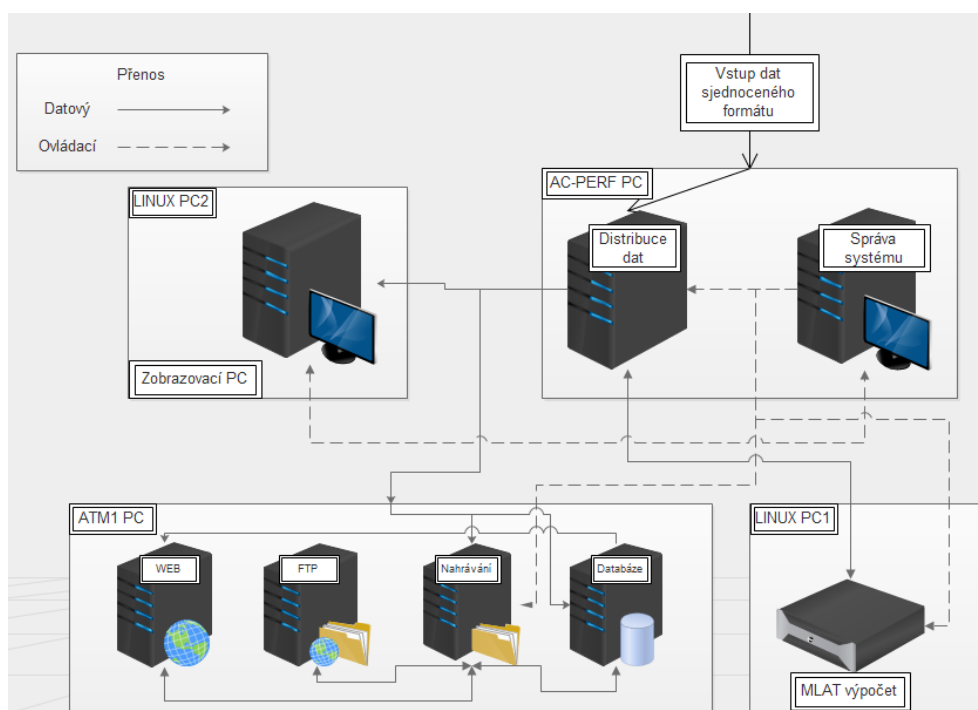
Posledním krokem je zde označení každé zprávy systémovým datem a časem, z důvodu absence této informace v přijímaných zprávách a také kvůli archivaci. Tento krok opět obsahuje přidávání hexadecimálních znaků do zprávy. Systémové datum a čas navrhuji ukládat pomocí 9 hexadecimálních znaků. Tento způsob zajišťuje přesnost na desetinu sekundy, ale potřebuje nastavit referenční datum, k němuž se bude výpočet vztahovat. První 4/9 znaků značí počet dnů uplynulých od referenčního data. 4 znaky znamenají 16^4 možností, což je 65.536 možných kombinací. Pokud toto číslo vydělíme počtem dní v roce (365,25), dostáváme počet let od referenčního data, po které tento výpočet bude fungovat. Výsledkem je 179,4 let. Následujících 5 znaků znamená počet sekund od půlnoci. Den má celkem 86.400 sekund a my se tedy v počtu hexadecimálních možností musíme dostat nad toto číslo. 16^4 dává celkem 65.536 kombinací, což nestačí, a proto použijeme zmiňovaných 5 znaků, které znamenají 1.048.576 možností. Vzhledem k faktu, že jsme dostali číslo 10x větší než 86.400, jsme schopni zapisovat čas s přesností na desetiny sekundy.

Následuje redistribuce takto upravených zpráv buď přímo na výpočetní server, nebo na redistribuční anténu posílající data k výpočetnímu centru.

3.2.2 Softwarové procesy na úrovni výpočetního centra

Vstupem do výpočetního centra je jednotný formát dat s časovou značkou a identifikací zdrojové přijímací stanice.

Na obrázku 3.6 jsou popsány hlavní procesy probíhající v počítačích ATM laboratoře, která je zamýšlena jako výpočetní centrum MLAT systému.



Obrázek 3.6: Procesy probíhající v zařízeních ATM laboratoře.

Jako primární zařízení je zamýšlen počítač s názvem AC-PERF, na kterém poběží hlavní distribuční server pro šíření dat v ATM laboratoři a správa systému.

Datovým distribučním serverem je myšlen proces zprostředkování dat mezi počítači. Je zbytečné, aby se všechna zařízení napojovala na centrální redistribuční stanici a z ní se posílal 4x totožný tok dat, pouze s rozdílem cílové destinace. Navrhovaným řešením bude redistribuční stanice spojena jedním tokem dat s datovou distribuční stanicí v ATM laboratoři a hlavní tok dat bude probíhat až na úrovni interní sítě v laboratoři. Tím se sníží vytížení sítě na 25% pokud uvažujeme, že bez distribučního serveru by

si data z redistribuční stanice bralo nahrávací, databázové, výpočetní a zobrazovací centrum.

Správa systému nastavuje například parametry nahrávacího serveru - dobu, po kterou se mají data uchovávat, data, jež se mají nahrávat. Nastavuje MLAT výpočetní server - kontroluje GPS pozice přijímacích stanic, specifikuje interval vyhledávání totožných zpráv a také nastavuje formát dat na výstupu z výpočetního systému. Dále nastavuje distribuční server - kam a jaká data má zasílat. Také je propojena se zobrazovacím PC, protože zde se data zobrazují a je třeba mít možnost volby, jaká data zde chceme zobrazit. Když se provede volba zdroje dat, zobrazovací PC vyšle signál správě systému a ta přenastaví distribuční server, který začne na zobrazovací PC zasílat požadovaná data.

Zobrazovací PC primárně zobrazuje přijímaná data v reálném čase, vypočítaná data v reálném čase, fúzi těchto dat, zpětné přehrávky jak z nahraných, tak i z vypočítaných dat. Dále zde mohou probíhat pokročilejší statistiky a jiné méně náročné procesy, protože zobrazování v reálném čase neprobíhá vždy a tím dochází k uvolnění této výpočetní kapacity.

Počítač s názvem ATM1 již nyní funguje jako nahrávací, web a ftp server. Tyto funkce mu zůstanou a navíc mu přibude funkce centrální databáze. Zde se budou také zaznamenávat data, ale mohou zde fungovat i filtry a analytické nástroje pro databáze.

FTP server zajišťuje uživatelům přístup k uloženým datům z nahrávacího serveru. Samozřejmostí je přístup pomocí uživatelského jména a hesla a zároveň bude každý přístup zaznamenáván do záznamu činností.

Web server je hlavním prezentačním nástrojem ATM laboratoře. Funguje na něm zobrazování veškerých přijatých dat z přijímačů, základní statistiky přístupné z internetu, je zde přístup k nahrávkám z nahrávacího serveru s pomocí jména a hesla a bude zde fungovat i zobrazování výsledků multilateračních výpočtů.

Posledním prvkem je MLAT výpočetní server. Vstupem je zde tok dat z distribučního centra ve standardním formátu, se systémovým časem a s označeným zdrojem zprávy. Prvním prvkem MLAT výpočtu je vyhledání stejných zpráv, výpočet jejich TDOA a z časových rozdílů pak samotný MLAT výpočet.

Aktuální stav přijímacích stanic Fakulty dopravní

Jak jsem již zmínil, v průběhu mého magisterského studia se zakoupily celkem 3 ADS-B přijímače, které se v rámci práce na studentské grantové soutěže začaly rozmisťovat na pevné pozice. Cílem bylo vytvořit stabilní síť pozemních přijímacích stanic pro multilaterační systém.

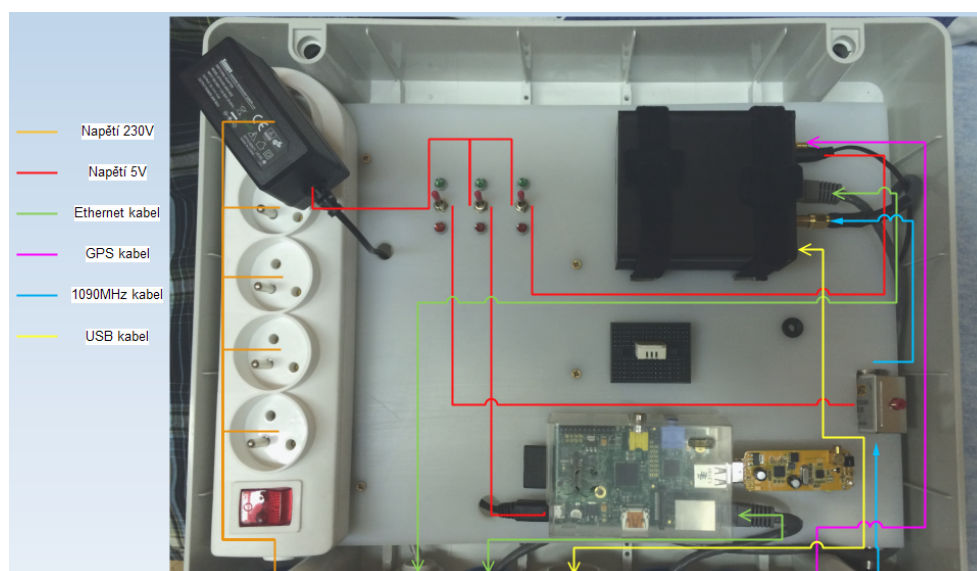
První zakoupený přijímač Radarcap RC68 byl nejprve dočasně umístěn v ATM laboratoři, kde se studenti seznamovali s možnostmi a daty z přijímače. Následně jsem začal pracovat na možném umístění přijímače na lepší pozici.

4.1 Koleje Strahov

Prvním realizovaným řešením stabilního umístění přijímací stanice se stala lokalita strahovských kolejí.

Hlavním důvodem byla snadná přístupnost v případě potřeby provedení údržby zařízení. Strahovské koleje se nacházejí mezi strahovským stadionem a petřínskou rozhlednou. Se správou účelových zařízení (SUZ) ČVUT bylo domluveno jednání o možném umístění zařízení na střeše jednoho z místních bloků. Zde se schválilo umístění na střeše bloku 11 z důvodu plánovaných oprav střešních prostor ostatních bloků. Klub Silicon Hill, zajišťující zde připojení k internetu, nám umožnil využívat svou síť pro připojení našeho přijímače. Následně proběhla návštěva střešních prostor a strojovny výtahu, kde bylo se správcem areálu dohodnuto přesné umístění přijímače. Díky možnosti využití strojovny jako centrální pozice pro samotný přijímač a vyvedení samotné antény ven, jsme nemuseli řešit jakékoli vlivy povětr-

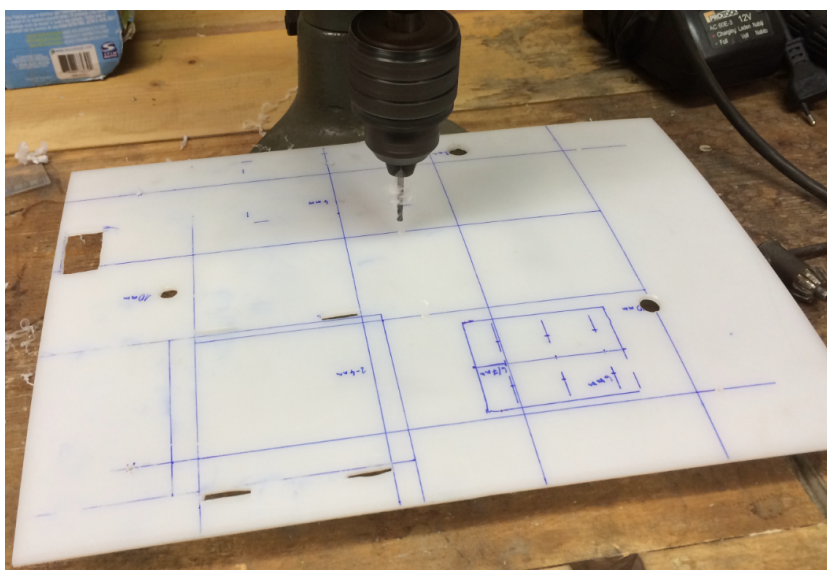
nostních podmínek, zmíněné v kapitole 2.2.1. Kromě samotného přijímače jsem box navrhoval ještě pro experimentální využití zařízení RaspberryPi, multi-zásuvky a případného senzoru teploty a napájecího zařízení pro zesilovač. Schéma přijímací stanice na Strahově je zobrazeno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Výsledný vzhled boxu strahovské přijímací stanice (zdroj: autorův archiv).

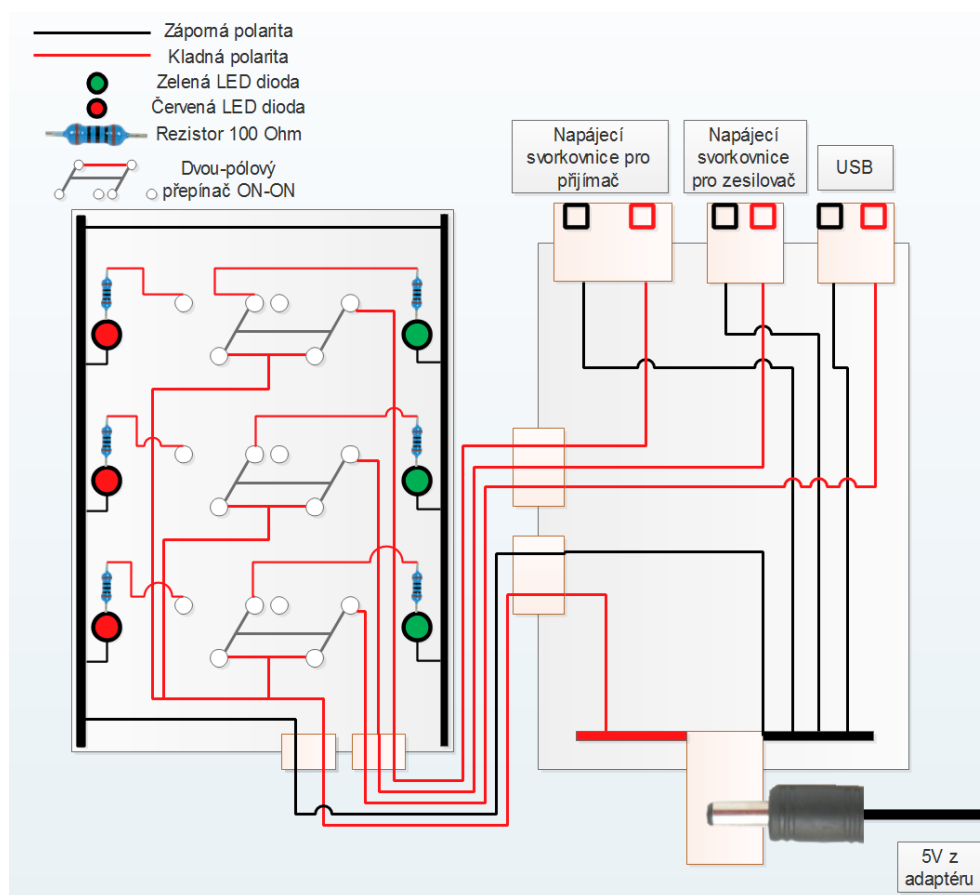
Vzhledem k nutnosti izolace od okolního prostředí jsem zvolil PVC krabici o rozměrech 380 x 300 x 120 mm se stupněm krytí IP56, což je pro potřeby vnitřní instalace naprosto dostačující. Jedná se o jednoduchý box pro instalaci na zeď s odšroubovatelným víkem. Z důvodu zajištění přehlednosti jsem v boxu navrhl druhé dno, jako panel separující kabely od vnějších zařízení, jehož výroba proběhla na zakázku. Následovalo navržení umístění veškerých zařízení v boxu. Pro upevnění zařízení k desce jsem zvolil, v případě přijímače, dvojici suchých zipů, v případě RaspberryPi obdobné připevnění jako na zeď - pomocí dvou šroubů. Pro vícenásobnou zásuvku jsem zvolil taktéž dva šrouby. V další fázi přípravy stanice jsem upravil panel pro přesné uchycení zařízení (viz. obrázek 4.2).

Samotnou vnitřní část boxu jsem se snažil navrhnout co nejuniverzálněji, proto jsem věnoval velkou pozornost možnostem napájení. Všechna zařízení, se kterými se počítalo pro umístění do boxu, jsou napájena pomocí 5 V stejnosměrného napětí. Měl jsem tedy 2 možnosti: buď do boxu zavést již zmíněných 5 V a ušetřit vnitřní prostor, ale nepředpokládat žádné



Obrázek 4.2: Úprava vnitřního panelu pro instalaci v boxu přijímací stanice (zdroj: autorův archiv).

změny ve vnitřním uspořádání zařízení, nebo do boxu zavést střídavé napětí ze sítě 230 V a mít možnost případně zapojit jiná zařízení do zásuvky pomocí adaptéru. Zvolil jsem univerzální kombinaci obou možností. Do boxu jsem sice přivedl napětí 230 V a uvnitř řešil napětí pomocí 5 V adaptéru, ale navrhl jsem napájecí systém, který zobrazuje stav napájených zařízení (zapnuto/vypnuto) a je schopen napájet všechna 3 zařízení (přijímač, RaspberryPi a případný napájecí modul pro zesilovač signálu) pouze pomocí jednoho adaptéru. Jedná se o soustavu kabelových spojů, odporů (100 R), LED diod (zelená a červená) a potřebných konektorů připájených na předvrtanou desku pro jednoduché návrhy plošných spojů. Odporů jsou sériově zapojeny k LED diodám z důvodu snížení vstupního napětí. Napájecí spoj je zobrazen na obrázku 4.3, kde jsou vidět také veškerá spojení mezi přepínači a konektory.



Obrázek 4.3: Schéma napájecího obvodu pro rozvod 5 V napětí v boxu přijímací stanice.

Vstup napětí do obvodu je řešen pomocí konektoru 2,1 x 5 mm z adaptéru, který je v tomto případě zapojen do zásuvky ve vnitřní části boxu. Pro vytvoření tohoto obvodu jsem použil 2 předvrtané desky pro plošné spoje - jednu pro rozvod a druhou pro ovládání, viz obrázek 4.3. Z první rozvodové desky vede záporný pól do výstupních svorek a USB a kladný pól do ovládací desky, kde je veden do centrálních pinů pákových přepínačů. Ty jsou řešeny dvojitě - jedná část pro LED diody a druhá pro napájení zařízení. V případě, že je přepínač uveden do polohy ve směru k červené diodě, prochází proud červenou diodou a ve druhé části přepínače neprochází nikam. Pokud je však přepínač v poloze směrem k zelené diodě, prochází proud zelenou diodou a spojena je kladná napájecí větev směrem k výstupním konektorům. Ovládací přepínače pro každou napájecí větev jsou zde z důvodu možného připojení/odpojení zařízení od napájení bez nutnosti od-

pojení celého adaptéru, což by vedlo k odpojení všech připojených zařízení. Pro výpočet potřebných odporů k zapojení LED diod jsem potřeboval znát parametry zdroje a diody. Výrobce udával napětí na diodě 2,6 V a na zdroji jsem naměřil 5,18 V. Z rozdílů těchto hodnot se pomocí Ohmova zákona a proudu na LED diodě 0,035 A vypočítá hodnota odporu 73,7 Ohmu. Hodnotu rezistoru 100 Ohmů jsem volil z důvodu její standardní výroby a také proto, že v případě zvýšení odporu se sníží zatížení diody, snížení odporu by mohlo vést ke zničení diody. Na výstupu z obvodu jsem volil 2x svorkovnice a jednou USB, protože přijímač je napájen pomocí standardního konektoru 2,1 x 5 mm, který je snadno dostupný s kabelovým zakončením pro sevření ve svorkovnici, napájecí okruh pro zesilovač také disponuje kabely k sevření a RaspberryPi je napájeno pomocí micro-USB, které se nejčastěji používá ve formátu s klasickým USB konektorem na druhém konci.

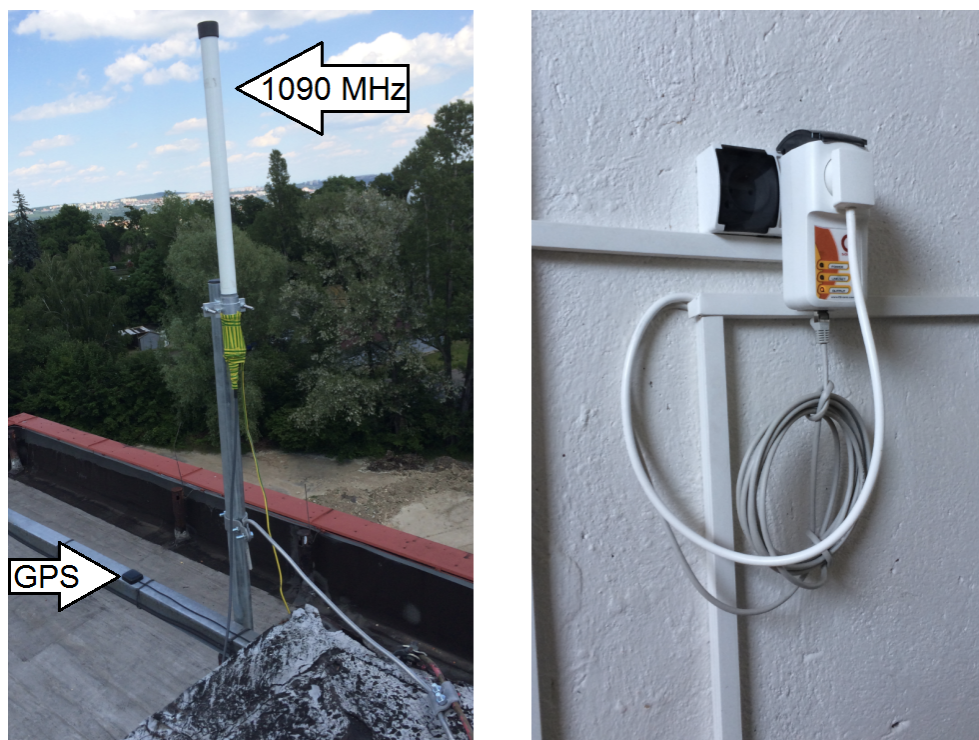
Napájecí obvod je ale vyřešen tak, aby fungoval, i kdyby se napětí do boxu vedlo pomocí POE a pomocí splitteru se pak zavedlo právě do mého napájecího obvodu. Maximální příkon zařízení napájených přes POE je několikrát vyšší než kapacita samotného napájecího adaptéru, která je udávaná na 3 A, tedy 15 W. Přijímač reálně nepřekročí hodnotu 5 W, RaspberryPi 5 W a pro napáječ zesilovače stále zbývá 5 W, jeho spotřeba je však v řádech desetin W.

Strahovská pozice byla původně plánována pro využití se zesilovačem signálu na frekvenci 1090 MHz. Zesilovač se však vzhledem ke kvalitní poloze antény ukázal jako nepotřebný a bylo tedy od jeho instalace do přijímací stanice upuštěno.

V době návrhu přijímací stanice bylo možné přijímač Radarcapce konfigurovat pomocí USB připojení, proto je propojen s vodotěsnou USB průchodkou. Nutno říci, že zde stále funguje instalovaný přijímač, který je schopen konfigurace pomocí USB, díky čemuž není třeba, kvůli konfiguraci, otevírat box. Bohužel se již přijímače s touto možností nevyrábí.

Z důvodu častého zasekávání přijímače jsem použil internetem ovládanou zásuvku 230 V, konkrétně typ IQSW-IP10. Toto zařízení je připojenou jednou stranou do zásuvky 230 V a druhou je do ní buď zapojeno zařízení, nebo v našem případě z ní vede kabel do zásuvek v boxu s přijímačem. Díky připojení k internetu funguje tato zásuvka jako internetové relé a je schopná řídit, kdy bude do boxu s přijímačem dodávána elektřina, čímž jsme byli schopni, v případě zaseknutí přijímače, ho vzdáleně restartovat bez nutnosti fyzického odpojení napájení. Tento problém byl vyřešen reklamací přijímače. V průběhu studia jsem navrhl nahrazení této zásuvky pomocí relé obvodu připojeného k RaspberryPi, schopného stejné funkce. Tento obvod bude popsán v následující kapitole věnované softwaru. Z důvodu potřeby této zásuvky v přijímací stanici na Pankráci byla zásuvka z

pozice Strahov odebrána. Zapojení zásuvky je zobrazeno vpravo na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Vlevo přijímací anténa 1090 MHz + černá GPS a vpravo zapojení internetem ovládané zásuvky IQSW-IP10 (zdroj: autorův archiv).

Druhou nejdůležitější částí přijímací stanice je samozřejmě přijímací anténa a její umístění. Díky existenci volného stožáru na střeše bylo možné zakoupit pouze nástavec, který byl následně připevněn ke stožáru. Konstrukce byla uzemněna a k ní přimontována samotná anténa pro frekvenci 1090 MHz. Anténa není přímo spojena s kabelem, ale je zde bleskojistka, která je uzemněna na zemnicí lištu pod stožárem. Následně z bleskojistky vede kabel dovnitř budovy až k boxu přijímače a zde vodotěsnou průchodkou dovnitř. Tento kabel je zakončen konektorem BNC, z důvodu možného využití zesilovače a následně je redukcí na SMA připojen k přijímači. Anténní konstrukce je zobrazena na obrázku 4.4 vlevo.

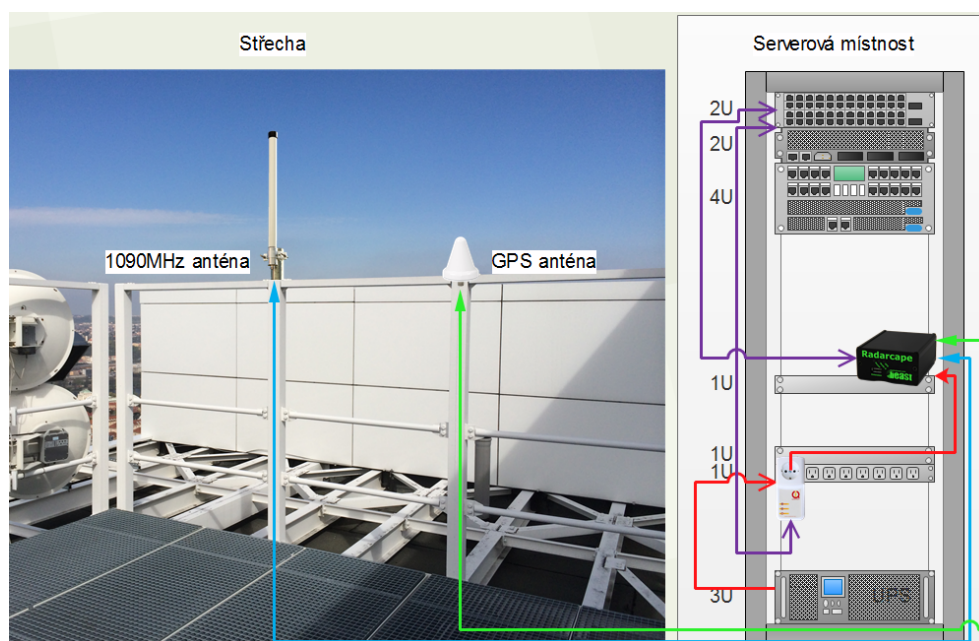
Magnetickou GPS anténu jsem připevnil na již uzemněnou kovovou konstrukci od světla na střeše a dodatečně zajistil plastovými pásky.

Posledním krokem bylo dovedení Ethernet kabelů do serverové místnosti pomocí instalačních lišt a rozvod elektřiny. V případě elektřiny byl využit

již existující kabel, vedoucí do spodního patra strojovny, který jsem pouze napojil a dovedl až k zásuvkám ve strojovně.

4.2 Pankrác

Tato lokalita se dlouhodobě jevila jako velmi atraktivní. Z tohoto důvodu bylo vyvinuto velké úsilí pro zajištění umístění přijímače v této lokalitě. Po vyřešení veškerých podmínek instalace bylo následně schváleno možné umístění zařízení v serverové místnosti na střeše a vyvedení antény na místní střešní konstrukci. Nejdůležitější zde bylo přesné změření šířky konstrukce pro anténní stožár a vzdálenosti mezi stožárem a rackovou skříní v serverové místnosti. Vzhledem k atypičnosti konstrukce o rozměru 10 x 10 cm nebyla velká možnost výběru stožáru požadované velikosti.



Obrázek 4.5: Schéma propojení zařízení na střeše a v serverové místnosti (zdroj: autorův archiv).

Zakoupený držák antény byl konstruován pro instalaci na stožár o průměru 12 cm. Vzhledem k tomu, že tato kovová konstrukce byla navržena na kruhové stožáry, museli jsme ji na čtvercové střešní konstrukci umístit velmi přesně. Samotná montáž na střeše byla provedena pomocí šroubů místo závitových tyčí, dodávaných k anténnímu držáku. Tímto krokem došlo

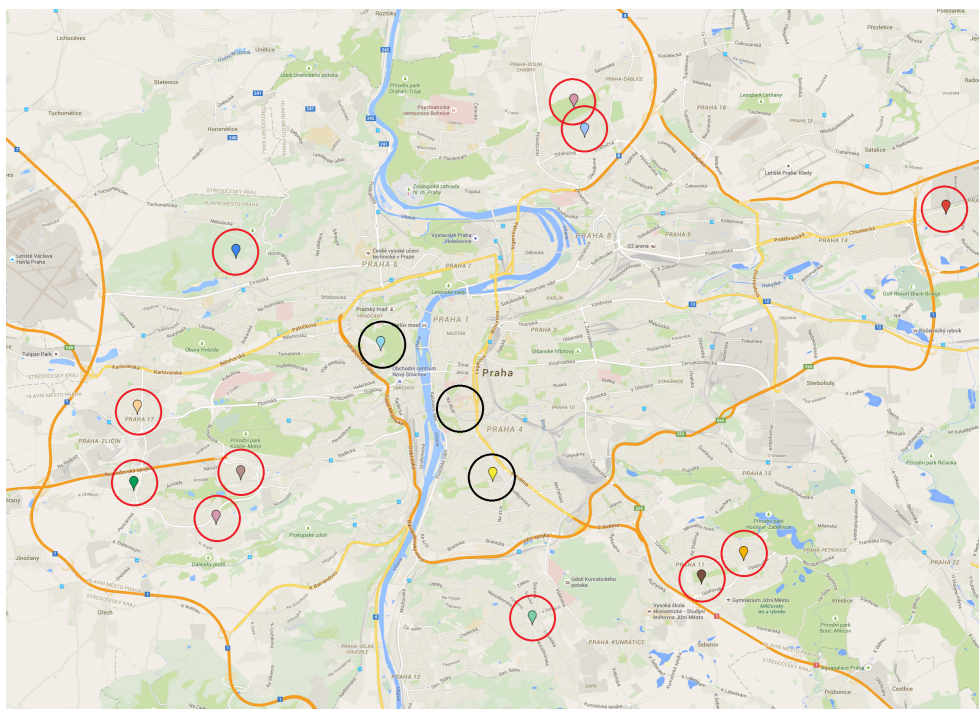
ke snížení pravděpodobnosti možného uvolnění matice, díky snížení celkového počtu matic ze 4 na 2. Místo obyčejných matic byly použity matice samojistné, které umožňují lepší upevnění k závitovým tyčím a tím zajišťují lepší odolnost vůči povětrnostním podmínkám. Díky již existujícímu uzemnění střešní konstrukce jsem nemusel řešit zemnění stožáru, ale pouze zemnění koaxiálního kabelu. Ten je uzemněn zhruba 14 m od antény v serverové místnosti společně s bleskojistkami ostatních antén. GPS anténa je zapojena pomocí 4 m dlouhého prodlužovacího kabelu s konektory SMB. Umístěna je vedle již přítomných GPS antén místního časového serveru.

Díky instalaci přijímače uvnitř serverové místnosti odpadly potíže s jakýmkoli zapouzdřením, takže instalace zde vyšla nejlevněji. Elektřina je vedena ze zálohovaného zdroje UPS, který v případě výpadku proudu napájí místní síťovou infrastrukturu, do internetem ovládané zásuvky a z ní pomocí 5 V adaptéru do přijímače. Obě zařízení jsou zapojena do místních switchů a tím i do sítě internet. Toto zapojení je zobrazeno na obrázku 4.5. Samotná instalace přijímače proběhla koncem dubna 2015.

4.3 Plánované lokality pro budoucí stanice

Se stoupajícím počtem přijímačů bude stoupat i počet lokalit potřebných pro umístění přijímacích stanic. Již nyní je jeden přijímač umístěn v laboratoři ATM systémů, protože pro něj zatím nebyla dohodnuta žádná kvalitní lokalita. To by se mělo v budoucnosti ale změnit. Pro potřeby sestavení seznamu možných lokalit jsem použil program Google Earth, který aktuálně disponuje 3D modely budov v Praze a dá se zde snadno odhadem určit, která budova je nejvyšší v oblasti. V kombinaci s pozorováním ze střechy na Strahově a pomocí fotografií na internetu jsem byl schopen sestavit seznam objektů vhodných pro umístění přijímače. Ve vyhledávání lokalit jsem kladl důraz hlavně na polohu vůči okolí a snažil jsem se vybírat místa mimo údolí. Také jsem kladl důraz na možné pokrytí Letiště Václava Havla, proto jsem navrhl několik možných lokalit v jeho blízkosti. Na obrázku 4.6 jsou zobrazeny možné lokality v Google Maps. Červeně jsou označeny možné lokality a černě aktuální lokality (květen 2015). Jedná se o kombinaci obytných a kancelářských budov. V jednom případě jsem uvedl jeden vysílač/geodetickou věž z důvodu perfektní lokality.

4.3. Plánované lokality pro budoucí stanice



Obrázek 4.6: Mapa lokalit vhodných pro umístění přijímacích stanic (převzato z [9]).

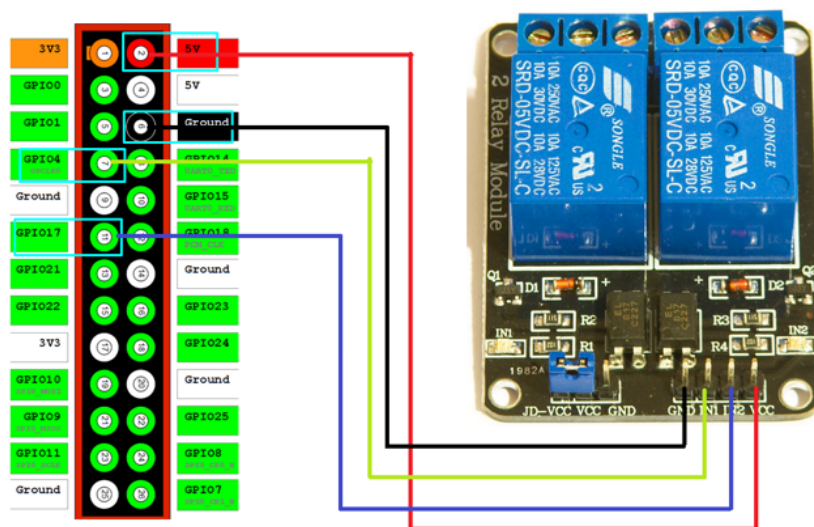
Návrh pomocného softwaru pro MLAT systém

V této kapitole popisuji mnou realizované softwarové aplikace. Jedná se především o pomocný software, přičemž některé mé aplikace pracují na serveru ATM laboratoře 24 hodin 7 dní v týdnu bez jakýchkoli problémů. Některé z mých dokončených softwarových projektů zde uvedu.

5.1 Ovládací software pro relé desku a RaspberryPi

Toto zařízení bylo zakoupeno a naprogramováno jako náhrada za internetem ovládanou zásuvku, která má pouze jedno možné využití - ovládání napájení. Na rozdíl od ní miniaturní počítač RaspberryPi může být využit nejen k ovládání relé desky, ale i k přijímání signálu, jeho dekódování, atd. V tomto případě se nejedná o naprogramování vlastního softwaru, ale pouze o zprovoznění free-ware aplikace. Jedná se o balíček WebIOPi [20], pomocí kterého je uživatel schopen monitorovat připojená zařízení, ovládat zařízení pomocí sériového výstupu a v našem případě ovládat GPIO porty. Deska je spojená s kontakty na počítači pomocí 4 kabelů. První dvojice jsou napájecí kabely stejnosměrného napětí 5 V a druhá dvojice jsou signální kabely, které ovládají, kdy jsou na relé spojeny které kontakty. Pomocí signálu ovládací deska pozná, kdy do relé zapojit zmíněných 5 V, což zajistí vytvoření magnetického pole a spojení vodičů ve vnitřní části relé. Konkrétní zakoupená relé deska je schopná ovládat napětí o hodnotách až 250 V střídavého proudu o hodnotě do 10 A. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 5.1.

Výsledkem je webová stránka, kde se dají ovládat různé GPIO výstupy



Obrázek 5.1: Schéma zapojení relé desky do RaspberryPi.

a tím i připojené relé desky. Samozřejmostí je přístup omezený heslem s možností přenastavení.

5.2 Software pro opakovaný záznam dat z přijímačů

Již od samého pořízení přijímače jsme se zabývali otázkou, jak nahrávat data. Vždy jsme museli manuálně zapnout nahrávání a stejně tak ho i vypnout. Tento způsob je však velmi nepraktický pro nahrávání velkých časových intervalů.

Dalším důvodem k vytvoření skriptu bylo možné zpětné dohledání dat. V případě, že se v prostoru našeho krytí něco stane, nezjistíme to okamžitě, abychom mohli data začít nahrávat. Rozhodl jsem se tedy, že vytvořím nějaký elegantní a jednoduchý software, který bude schopný nahrávat data nepřetržitě, v zadaných časových intervalech a po co nejdelší dobu, čímž vytvořím možnost zpětného dohledání dat. Se stoupajícím počtem nahraných dat stoupá i jejich velikost. Konkrétně zde mluvím o cca 400 MB dat ze dvou přijímačů za 20 min ve špičce. Data je třeba uchovávat pouze po dobu nezbytně nutnou pro případ zpětného vyhledávání. Vzal jsem si tedy příklad z digitálních videorekordérů používaných v kamerové zabezpečovací technice a rozhodl jsem se implementovat funkci „přemazávání dat“. S její

pomocí jsme schopni nastavit celkovou dobu, po kterou jsou data uschovávána, a při překročení této doby se vždy daný soubor smaže. Takto se využívá stále zhruba stejná kapacita prostoru na serveru a nemůže dojít k zaplnění disku nahrávkou.

Jako další možnost pro svůj program jsem zvolil automatický upload dat na FTP server. Tuto možnost jsem implementoval do vyšších verzí programu a data jsem uchovával jak na nahrávacím serveru, tak i uploadoval na vzdálený FTP server. Díky velikosti nahrávaných souborů neproběhne upload tak rychle jako přesun dat v rámci jednoho PC, což znamenalo, že pokud by můj nahrávací program čekal na dokončení uploadu na FTP server, došlo by k prodlevě a zprávy z přijímačů by po dobu uploadu nebyly nahrávány. Tento problém jsem vyřešil samostatným dávkovým příkazem, který se vždy spustí, ale hlavní program nemusí čekat na jeho dokončení, takže v době, kdy se začne soubor uploadovat, se již nahrávají další data a nedochází tak k prodlevě mezi nahrávkami.

Software jsem se rozhodl vyřešit pomocí příkazové řádky operačního systému Windows a tzv. „dávkového příkazu“. Ten má obvykle podobu souboru typu *.bat, který v sobě obsahuje spouštěcí sekvenci pro jiné programy.

Mnou naprogramovaný dávkový příkaz obsahuje také samotný nahrávací program z laboratoře ATM systémů a potřebuje ho ke své správné funkci. Protože samotný nahrávací program, který využívám, potřeboval vlastní konfigurační soubor, což by znamenalo nutnost 2 konfiguračních souborů, rozhodl jsem se tento problém vyřešit vytvořením automatizovaného generátoru konfiguračního souboru pro nahrávací program. Můj generátor čerpá data z jediného konfiguračního souboru *ADSB_recorder_server_config.ini* a pomocí načtených dat vytvoří konfigurační soubor s názvem *radar.conf*, obsahující zdrojové IP adresy pro nahrávání a formát nahrávaného souboru. Po úspěšném vygenerování konfiguračního souboru přejde program do fáze cyklického nahrávání specifikovaného časového intervalu dat a spustí se samotný nahrávací program pomocí opakovacího cyklu, díky němuž jsem zabezpečil správnou funkci programu i v případě, kdy selže nahrávací program z důvodu neznámého datového formátu zprávy. Jedná se o zprávy takového formátu:

Zpráva přijatá na přijímači Strahov:

```
@5003DFDB6E295@5003F6A303B85D484AD094270E;
```

Zpráva přijatá na přijímači Pankrác:

```
@5009F098640D5D484AD094270E;
```

Ze Strahova tedy přišla zpráva, která je kombinací dvou zpráv. Pro ukázkou je zde zpráva z Pankráce, totožná s kompletní zprávou ze Strahova. Bohužel však toto vložení jedné zprávy do jiné zapříčiní pád nahrávacího programu.

Tento problém jsem vyřešil pomocí dalšího cyklu vnořeného v automaticky spuštěném dávkovém příkazu. Tím je myšlen nový dávkový příkaz spuštěný hlavním dávkovým příkazem a starající se o stabilní fungování nahrávacího programu. Tento cyklus umožňuje, v případě pádu nahrávacího programu, jeho opětovné spuštění. To znamená, že program se může vypínat každou chvíli, okamžitě se ale zapne a takto je schopen pokračovat až do doby, kdy na hlavním nahrávacím programu vyprší odpočet doby pro nahrávání a tento sekundární nahrávací skript bude uzavřen. V případě, že se program samovolně vypne, je generován důvod vypnutí a můj cyklus tento důvod automaticky ukládá do zápisu o průběhu nahrávání, tzv. logu. V logu je vždy důležitý hlavně první řádek, kde je vypsán problém a dále čas vzniku problému. Programem vytvořený log vypadá takto:

```
Exception in thread "main"java.lang.NumberFormatException: For input
string: "38016D@"
:
Udalost nastala v po 04.05.2015 v 6:01:42,53 hodin.
```

Zde je opět vidět, že program byl uzavřen z důvodu zdvojené zprávy. To se dá poznat podle zavináče v problémovém stringu. Předpokládáme, že tyto zprávy jsou způsobeny překrytím slabé zprávy zprávou silnější. Na přijímač tedy přijde začátek slabší zprávy, ten pozná, že přišla zpráva a začne ji překládat. V průběhu však přijde zpráva silnější, která překryje zprávu původní a přijímač opět generuje začátek zprávy, ale tuto silnou zprávu dokončí. Bohužel žádný z našich nahrávacích programů není schopen ukládat i tyto „špatné“ zprávy, nicméně dá se využít i jiného softwaru pro nahrávání dat z přijímače. Jedná se o program Putty, který je schopen nahrávat veškerý přenos na specifikovaném portu, včetně špatných zpráv. Náš nahrávací software se potýká s výpadky, protože zprávy nejen nahrává, ale i zpracovává. Konkrétně převádí přesný čas na čitelnou formu, detekuje ICAO 24-bitovou adresu a překládá formát sestupné zprávy (DF).

Po vypršení časového intervalu stanovené doby nahrávání dojde ke zmíněnému uzavření nahrávacího programu, okamžitému přejmenování nahrávky a logu událostí podle času, kdy nahrávka začala a k přesunu nahrávky a logu do požadované složky, specifikované v konfiguračním souboru. V případě potřeby by nyní došlo i k uploadu na FTP server, ten ale v poslední verzi programu nepoužívám, protože je zapnut na serveru ATM laboratoře, na kterém je zapnut i WEB a FTP server, díky čemuž není třeba upload na FTP server využívat.

Jakmile se dokončí přesun/upload nahrávky, dostává se program do fáze, ve které se rozhodne, zda je nejstarší nahrávka starší než maximální doba specifikovaná pro ponechání dat na serveru. Pokud se zjistí, že existuje nahrávka starší, je tato nahrávka vymazána. Tento proces není řešen pomocí názvů nahrávek, kde je uvedené datum a čas začátku nahrávky, ale pomocí maximálního počtu existujících nahrávek, tedy program vypočítá, kolik je ve složce souborů konkrétního formátu a pokud zjistí, že je zde víc souborů, než je maximální počet, tak nejstarší soubor vymaže. V konfiguračním souboru je specifikována doba, po kterou se mají nahrávky uchovávat. Pomocí této hodnoty a pomocí velikosti nahrávaného intervalu se vypočítá maximální počet souborů. Uvedu příklad:

Obsah konfiguračního souboru:

```
REM Delka nahravaciho intervalu
```

```
set record_length_day=0
```

```
set record_length_hour=0
```

```
set record_length_min=20
```

```
REM Po kolik dnech mazat soubory?
```

```
set store_time_days=10
```

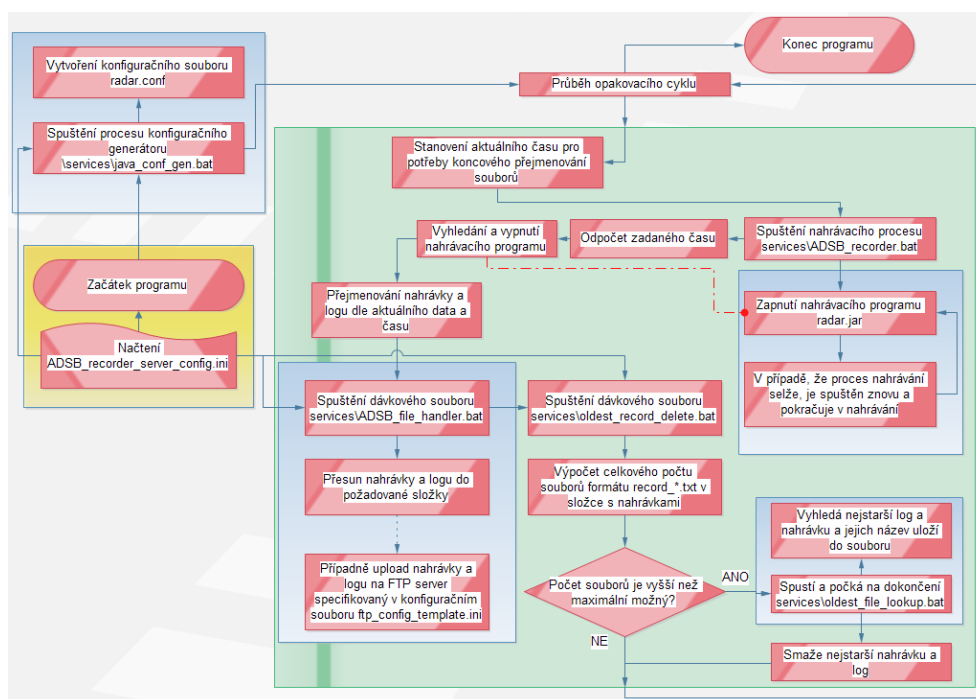
```
-----
```

Zde lze vyčíst délku nahrávaného intervalu - 20 minut a maximální stáří souboru - 10 dní. V tomto případě je maximální počet uchovaných nahrávek roven číslu 720. K tomu jsem došel výpočtem 10 (max. stáří) * 24 (hodin) * 3 ($60/20 = 60\text{min}/\text{délka intervalu}$) = 720 . V případě zadaných hodnot ve dnech a hodinách se výpočet provádí podobně.

Pokud tedy program zjistí, že ve složce je 721 nahrávek, vyhledá nahrávku nejstarší a vymaže ji. Stejný proces proběhne se záznamem chybových hlášek. Vyhledávání a mazání je také řešeno jako externí skript, díky čemuž nejsou vytvářeny prodlevy mezi konce jednoho záznamu a začátkem nového. V době vyhledávání program již nahrává nový soubor a odpočítává znovu čas do konce nahrávky - nachází se v dalším opakování cyklické nahrávky.

Na obrázku 5.2 je zobrazeno jednoduché schéma průběhu cyklického nahrávacího programu.

5.2. Software pro opakovaný záznam dat z přijímačů



Obrázek 5.2: Průběh cyklického nahrávacího programu pro účely neustálého záznamu dat z přijímacích stanic.

Výpis průběhu cyklického záznamu dat:

1001 kolo procesu

Nahravam data do souboru: record_20150528012101.txt

Doba čekání: 0 sekund, stisknutím kláves CTRL+C akci ukončíte...

ÚSPĚCH: Procesu s PID 1312 byl odeslán signál ukončení.

1002 kolo procesu

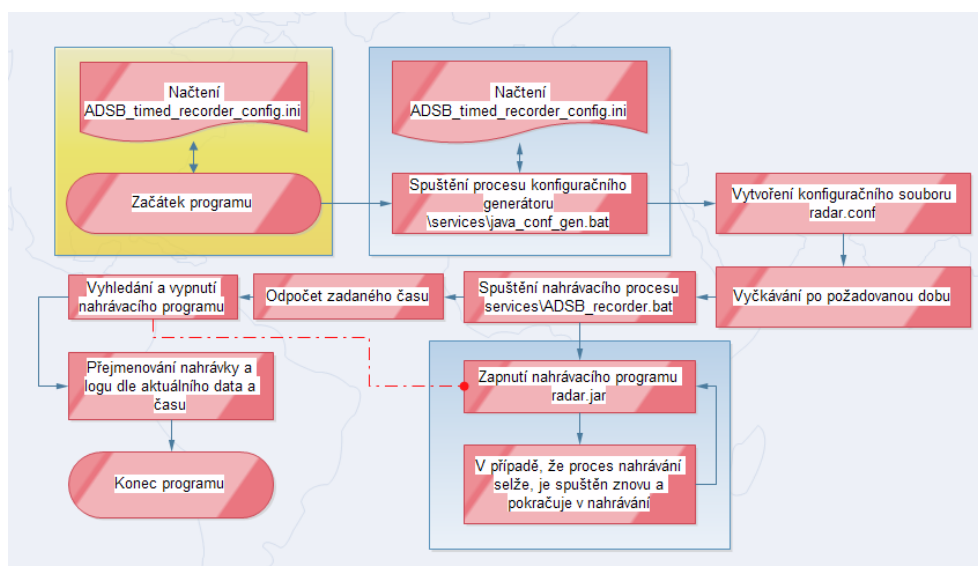
Nahravam data do souboru: record_20150528014102.txt

Doba čekání: 1108 sekund, stisknutím kláves CTRL+C akci ukončíte...

Software je přiložen v příloze: adsb-recorder-server_v2.2.rar

5.3 Software pro vytvoření jednorázového záznamu dat z přijímačů

Mnohokrát se mně a mým kolegům stalo, že jsme data chtěli nahrávat po přesně stanovenou dobu, například 20 minut. Dříve jsme tuto potřebu řešili zapnutím nahrávacího programu radar.jar a nařízením hodinek nebo mobilního telefonu na odpočítávání 20 minut. Bohužel, mohlo dojít k ukončení záznamu z důvodu, který je zmíněn v předchozí kapitole a místo 20-ti minutové nahrávky mohla vzniknout nahrávka 5-ti minutová. Proto jsem se rozhodl upravit cyklicky nahrávající program pro potřeby jednorázového použití. Využil jsem již naprogramovaného skriptu, který jsem pouze upravil pro jednorázové potřeby. Jednorázový skript má vlastní konfigurační soubor, kde je možné nastavit zpoždění nahrávání, dobu po jakou se budou data nahrávat a počet a adresy přijímacích stanic. Základní princip programu je naprosto stejný jako u cyklického nahrávání, s rozdílem, že v tomto skriptu se nevyhledávají/nemažou nejstarší záznamy a neprobíhá cyklické opakování nahrávání ani přesun nahrávek. Na obrázku 5.3 je zobrazeno schéma průběhu jednorázového nahrávacího skriptu.



Obrázek 5.3: Průběh jednorázového nahrávacího skriptu.

Program se jednoduše nastaví, spustí a následuje vyčkávání nastavenou dobu, po jejímž uplynutí začne nahrávací proces. Jakmile začne záznam, začne i odpočet doby pro záznam a jakmile se dojde k nule, záznam se

ukončí a data se přejmenují stejně jako v cyklickém programu. Výsledkem je záznam o přesně definované délce, což je vidět na první a poslední zprávě 20-ti minutového záznamu:

```
2015/05/14,00:06:11;22:6:6.853159359;127.0.0.1:10002;. . .
406590;17;@4DB3B2DA2DBF8D40659058A104720ED58248D016;
```

:

```
2015/05/14,00:26:11;22:26:6.877461140;127.0.0.1:10002;. . .
76CD73;17;@4EDFF44CFE948D76CD7358B500D63F2822440837;
```

Na tučných a podtržených hodnotách je vidět přesný 20-ti minutový rozdíl jak mezi systémovým časem (první hodnota na řádce), tak i mezi GPS časem (druhá hodnota na řádce).

Software je přiložen v příloze: adsb-timed-recorder_v1.0.rar

5.4 Webový server MLAT systému

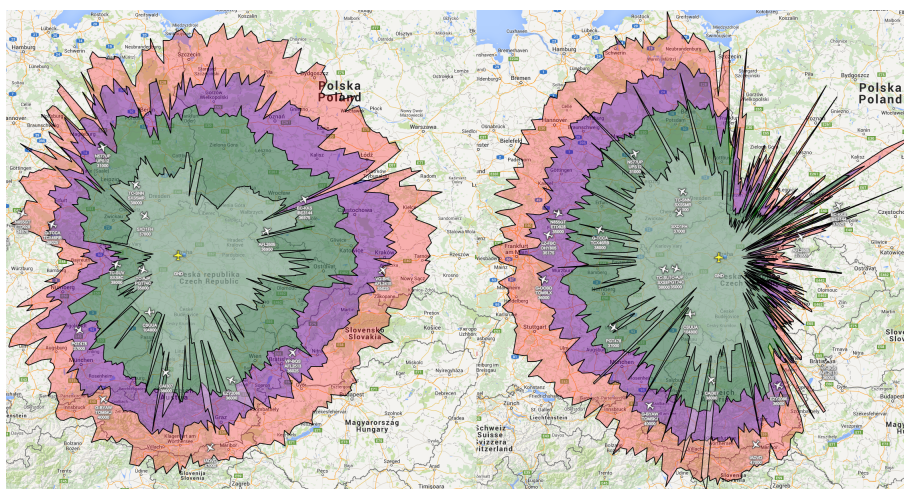
Z důvodu prezentace výstupů z přijímačů jsem zprovoznil webovou stránku <http://k621-adsb.fd.cvut.cz>. Zde je možné sledovat aktuální situaci letového prostoru buď pomocí fúze dat z fakultních ADS-B přijímačů, nebo si vybrat v menu konkrétní přijímač a zobrazit v mapě pouze data od něj. O tento typ zobrazování se stará program Virtual Radar Server, který je napojen na všechny přijímače a promítá jimi přijímaná data do mapy. Dále je zde možnost zobrazení maximálního dosahu přijímače.

V menu na webu je také možné si zobrazit maximální dosah konkrétního přijímače buď celkový, nebo v závislosti na letové hladině. Na obrázku 5.4 je vidět rozdíl maximálních dosahů. To je způsobeno hlavně omezeným krytím (pouze 180°), na rozdíl od přijímače na Strahově, který má 360° krytí. Snížené krytí přijímače Strahov na západě je způsobeno železo-betonovou konstrukcí Strahovského stadionu.

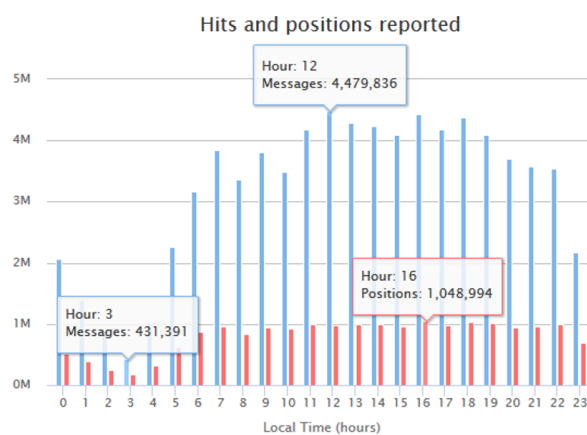
Webový server má i další funkce, mezi kterými se dá pohybovat pomocí lišty v horní části okna prohlížeče. Tlačítkem *Air Traffic View* je myšleno výše zmíněné okno programu Virtual Radar Server. ADS-B statistiky uživateli zobrazí instalace programu ModeSmixer2, který je schopen zpracovávat data z přijímačů a zobrazovat jejich základní statistiky.

Dále byla na WEB serveru vytvořena oblast s omezeným přístupem, ve které jsou k dispozici veškerá zaznamenaná data za posledních několik dní v závislosti na nastavení nahrávacího programu. Jsou zde k dispozici jak nahrávky, tak záznamy chybových událostí. Autorizace pro vstup do této části webu je řešena na bázi Internetové informační služby (IIS) systému Windows, kterou jsem použil pro funkci celého serveru. Ověřování přihla-

5.4. Webový server MLAT systému



Obrázek 5.4: Vlevo maximální dosah přijímače Strahov a vpravo přijímače Pankrác (zdroj: instalace programu Virtual Radar Server).



Obrázek 5.5: Statistika počtu přijatých zpráv na jednom přijímači za 24 hodin. Červená data znamenají zprávy obsahující polohu a modrá jakékoli zprávy (zdroj: instalace programu ModeSmixer2).

šovacího jména a hesla je řešeno pomocí ověřování systému Windows. To znamená, že každý uživatel musí mít na serveru nastavený vlastní účet, který ho opravňuje ke vstupu do různých částí webu. Prostřednictvím IIS jsem také nastavil server FTP, pomocí kterého je také možný přístup k záznamům a dalším datům ATM laboratoře.

5.5 Automatizační skript pro cyklické spouštění MATLAB skriptu

Pro potřeby automatizace ve zpracování ADS-B dat programem MATLAB jsem naprogramoval dávkový soubor, který je schopen aplikovat jeden MATLAB skript na libovolný počet datových souborů. Tento automatizační skript jsem využil hlavně pro zpracování dat přes noc. Skript spolupracuje se skriptem v programu MATLAB, takže není možné jeho samostatné využití a skript v programu MATLAB musí být speciálně upraven pro tuto spolupráci. Princip automatizace je takovýto:

1. Uživatel do souboru *matlab_conf.ini* zadá názvy záznamů dat, které chce zpracovat stylem:
set filename1=record_20150513-102056.txt
set filename2=record_20150513-104056.txt
2. Spustí skript *matlab_automatize.bat*.
3. Dojde k vytvoření souboru *load_filename_automatize.txt*.
4. Skript načte názvy nahrávek ze souboru *matlab_conf.ini*.
5. Začne probíhat opakovací cyklus, který do souboru *load_filename_automatize.txt* nahraje název souboru s aktuálním číslem cyklu. Příklad: cyklus prochází 1. opakováním, do souboru *load_filename_automatize.txt* tedy vkládá proměnnou s názvem filename1. V takto upraveném souboru bude následně uložen text: record_20150513-102056.txt .
6. Spustí se MATLAB skript s parametrem pro vyčkání do zhotovení výsledku.
7. Dojde k načtení obsahu souboru *load_filename_automatize.txt*, kde se nachází název nahrávky pro zpracování
8. Nahrávka se zpracuje, projde skriptem, vytvoří se výsledky a program MATLAB se ukončí.
9. V případě, že je zde další název souboru, proběhne druhé kolo cyklu, do souboru *load_filename_automatize.txt* se uloží další název nahrávky a takto skript pokračuje dle nastavení.

Analytické nástroje

Součástí mé práce jsou také analytické nástroje v prostředí programu MATLAB. Konkrétně jsem naprogramoval dva větší skripty. První překládá většinu formátů zpráv sestupných spojů Modu S a druhý hodnotí kvalitu příjmu přijímače.

Vzhledem k tomu, že výstupním formátem zpráv je, mimo jiné, posloupnost hexadecimálních znaků, potřeboval jsem k jejich zpracování vhodné dokumenty, popisující datový formát zpráv a binární posloupnosti:

- Letecký předpis L10 - Svazek IV - Přehledové a protisrážkové systémy
- RTCA DO-260B - Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services Broadcast (TIS-B)

6.1 Mode S dekodér

Jako první data-zpracující skript jsem naprogramoval dekodér zpráv přijatých ADS-B přijímači. Cílem práce bylo vytvořit skript schopný zpracovat nahrávku dat, roztřídit ji podle sestupných formátů a vybrané formáty přeložit do čitelné formy. Výstupem z programu jsou buněčná pole v programu MATLAB, kde jsou do čitelného formátu přeloženy veškeré dostupné informace o zprávách sestupných spojů typu DF0, DF4, DF5, DF11, DF16, DF17, DF19, DF20 a DF21. Skript jsem naprogramoval tím způsobem, aby se nejednalo pouze o algoritmus pracující v jednom souboru, obsahující všechna data pro překlad zpráv, ale aby využíval separátní funkce mimo

samotný skript s algoritmem. Díky této vlastnosti jsem mohl naprogramované funkce využít i v jiných skriptech, jako například v případě hodnocení kvality příjmu pozemního přijímače. Z tohoto skriptu byly využívány spíše dílčí funkce k tvorbě jiných skriptů, což vedlo k omezení práce na tomto dekodéru. Skript probíhá zhruba takto:

1. Uživatel definuje název záznamu dat, který chce zpracovat.
2. Proběhne deklarace proměnných, což je základ pro rychlou práci MATLAB skriptu. V případě, že se proměnné nedeklarují již na začátku skriptu a dojde k jejich vytvoření a následnému zvětšování jejich velikosti za běhu skriptu, dochází ke zpomalení průběhu programu.
3. Následně uživatel zadá počet řádků, který chce zpracovat. Tato možnost je zde pro případ, že by uživatel nechtěl čekat na všechna data dlouhou dobu, ale chtěl zpracovat jen prvních N zpráv.
4. Spustí se funkce `fce_Data_format_loader_N_ty_radek`, do které vstupuje název zpracovávaného souboru z kroku 1 a počet zpracovávaných řádků N. Výstupem je buněčné pole obsahující původní soubor s daty roztríděnými do buněk dle specifikovaného formátu, používaného v ATM laboratoři pro záznamy dat.
5. Následuje zadání zprávy do jedné proměnné a zadání přesného času do jiné.
6. Ze zprávy je vyčten její sestupný formát (DF).
7. Cílem následující části je rozčlenění zpráv jednotlivým funkcím v závislosti na formátu sestupného spoje. Každý má obvykle svou funkci, jako například formát DF4, který je překládán funkcí `fce_DF4_decoder`. V případě, že se v průběhu rozčlenění nenažde vhodná funkce (zpráva je jiného typu než naprogramované formáty), je tato zpráva uložena do buněčného pole proměnné `DF_OSTATNI_data`.
8. V případě zprávy typu DF17 se skript opět dělí do soustavy podmínek, které porovnávají Type Code (TC) přijaté zprávy. Zde existuje 32 různých kódů - formátu od 0 do 31. Zpracovány jsou pouze některé.
9. Předposlední částí je výpočet počtu přeložených zpráv (může se lišit od počtu zpracovaných) a statistika rychlosti průběhu skriptu.
10. Poslední volitelnou částí je uložení výstupních dat do tabulek formátu pro program Microsoft Excel.

Jako příklad výstupu uvedu několik hodnot z proměnné, obsahující informace o zprávách typu DF4, tedy odpověď sledování výšky.

DF – formát sestupného spoje

FS – status letu

DR – požadavek sestupného spoje

UM – služební zpráva

AC – hodnota výšky

AP – adresně-paritní pole

IIS - identifikace dotazovače

IDS - typ rezervace vytvořené dotazovačem

Tabulka 6.1: Výsledky překlada zpráv typu DF4, obsahující výšku a další informace.

DF	FS	DR	UM - IIS	UM - IDS	AC	AP
4	0	0	'0'	0	37000	'0C9E8A'
4	0	0	'0'	0	37000	'3B0E35'
4	0	0	'0'	0	36000	'CA143A'
4	0	0	'0'	0	14000	'B64CAC'
4	0	0	'0'	0	39975	'AD5265'
4	0	0	'0'	0	37050	'01B816'
4	0	0	'0'	0	34000	'1C18ED'
4	0	0	'0'	0	39000	'2DE6CC'
4	0	0	'0'	0	39975	'AD5265'

Software je přiložen v příloze: DF_decoder_v4.rar

6.2 Skript pro hodnocení kvality příjmu ADS-B přijímače

Nutnou podmínkou funkce multilateračního systému je nalezení shodných přijatých zpráv na minimálně čtyřech přijímacích stanicích (pro 3D lokalizaci). Vzhledem ke skutečnosti, že na přijímači není nikdy přijato 100% letadly vyslaných zpráv, dochází k ovlivnění funkce celého systému. Tento skript mapuje procentuální schopnost příjmu teoreticky všech zpráv v závislosti na vzdálenosti od přijímače. Pro jeho naprogramování jsem však využil mnoho funkcí vytvořených pro skript předchozí. Skript je řešen pomocí automatizovaného spouštění (pro zpracování několika souborů za sebou), což jsem popsal v kapitole 5.5. Pro správnou funkci tohoto skriptu je třeba nastavit jeho parametry:

1. V souboru `matlab_conf.ini` nastavit názvy nahrávek ke zpracování se zvyšujícím se číslem v proměnné `filename1`.

2. Otevřít `matlab_automatize.bat` například v poznámkovém bloku a editovat následující údaje:

Na 17. řádku „for /l %%a in (1;1;1) do (“ editovat 3 čísla v závorce (toto je nastavení pro zpracování 1 souboru):

První číslo znamená počáteční hodnotu, se kterou bude načítána proměnná `filename` ze souboru. Pokud zde bude číslo 1, bude skript začínat od `filename1`, pokud číslo 5, začne se od `filename5`. Druhé číslo znamená velikost kroku následujícího cyklu. Je-li zde hodnota 1, znamená to, že po začátečním načtení `filename1` a zpracování jeho skriptu bude program pracovat s hodnotou $1 + 1 = 2$, tedy načte `filename2`. Pokud by zde byla hodnota 2, načetla by se proměnná `filename3` ($1 + 2 = 3$). Třetí číslo znamená koncovou hodnotu, tedy hodnotu poslední zapsané proměnné. Chceme-li zpracovat 10 záznamů, máme v souboru `matlab_conf.ini` zapsány proměnné `filename1 ... filename10` a požadujeme tedy zpracování těchto souborů. Koncovou hodnotou bude tedy hodnota poslední proměnné - tedy 10.

Následně je třeba v souboru `matlab_automatize.bat` upravit řádek 21, obsahující spouštěcí sekvenci MATLAB skriptu. Zde je třeba upravit cestu k využívanému skriptu. Pokud bude tento automatizační program společně se skriptem uložen na disku `C:\ve složce PRIJEM`, je třeba změnit řádek takto:

```
... ..('C:\PRIJEM\matlab_solve_vykon_prijimace_automatic.m')
```

3. V tomto nastavení bude automatizační program a skript fungovat za podmínky využití dodaného testovacího záznamu `record_20150509-`

6.2. Skript pro hodnocení kvality příjmu ADS-B přijímače

024814.txt, který obsahuje data z 2 přijímačů. Tato data byla zaznamenána v době, kdy měly přijímače rozdílné nastavení hodin - na jednom probíhala synchronizace času s UTC a na druhém s GPS. To vedlo k 16 s rozdílu časů, který je vyřešen uvnitř MATLAB skriptu solve_vykon_prijimace_automatic.m na řádkách od 126 do 130. V případě funkční synchronizace je třeba řádky 126, 127, 128 a 130 odstranit, ponechat pouze řádek 129.

Výsledkem tohoto automatizovaného skriptu je pak záznam průběhu zpracování dat a výsledků (*.txt) a mapa výskytu letadel (ve formátu *.fig a *.png). Záznam výsledků a průběhu zpracování zaznamenaných dat z doby nejvyššího vytížení letového prostoru vypadá takto:

Vypocet zacal v: 17 hodin, 28 minut a 18.065 sekund.

Elapsed time is 13.075002 seconds.

Data load - DONE

Elapsed time is 575.133326 seconds.

Data correction - DONE

Elapsed time is 7.065110 seconds.

ICAO24BIT - DONE

Elapsed time is 7.086227 seconds.

GPS cells - DONE

Elapsed time is 85.991155 seconds.

REL-AIR cells - DONE

Elapsed time is 362.114380 seconds.

Script - DONE

Statistics - DONE

Vypocet celeho skriptu trval: 0 hodin, 16 minut a 42.274 sekund.

Zpracovalo se celkem 3340557 zpráv(DF0-DF24)

145478 zprav typu DF17, tedy 22.9626% z celkoveho poctu zprav.

Skriptove zpracovani zprav DF17 trvalo: 0 hodin, 4 minut a 24.949 sekund.

Rychlost zpracovani zprav DF17: 549.0793 zprav/sec

Interval prijmu zprav je: 0 hodin, 19 minut a 59.5016 sekund.

Rychlost vypoctu(celkem) vzhledem k rychlosti prijmu je: 119.678%

Korekce vstupnich dat + selekce zprav DF17 zabrala: 0 hodin, 8 minut a 59.887 sekund.

6.2. Skript pro hodnocení kvality příjmu ADS-B přijímače

Vyhledání jedinečných ICAO24 adres ve zprávách DF17 zabralo: 0 hodin, 0 minut a 6.875 sekund.

Deklarace promenných pro urychlení procesu zabrala: 0 hodin, 1 minut a 25 sekund.

Proces zpracování DF17 zpráv (skriptu) zabral: 0 hodin, 4 minut a 24.949 sekund.

Celkový výpočet statistik zabral: 0 hodin, 0 minut a 7.578 sekund.

Celková úspěšnost soustavy 2 přijímačů (z přijatých a nepřijatých) přijetí zpráv na přijímači je: 36.9528%

Celková úspěšnost soustavy 2 přijímačů (z celkového průměru procentuálních úspěšností přijetí zpráv na přijímači je: 41.3792%

Úspěšnost příjmu ze vzdálenosti je následující:

<0;30): 38.9901% - individualně | 48.7687% - průměrem procent.

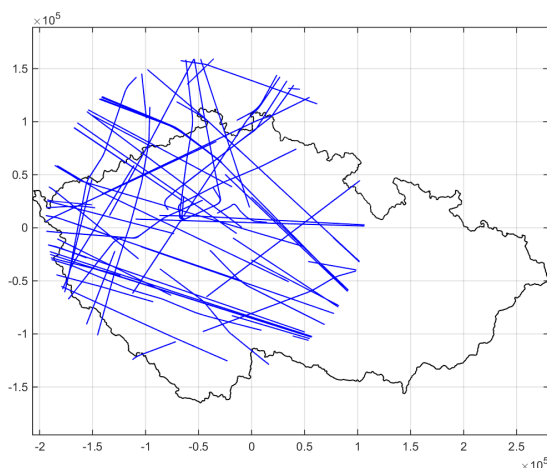
<30;60): 48.9852% - individualně | 54.1584% - průměrem procent.

<60;90): 41.2326% - individualně | 45.3688% - průměrem procent.

<90;120): 35.3935% - individualně | 38.7961% - průměrem procent.

<120;150): 27.8089% - individualně | 32.238% - průměrem procent.

<150+ : 14.3289% - individualně | 36.118% - průměrem procent.



Obrázek 6.1: Mapa výskytu letadel po dobu trvání záznamu (zdroj: MATLAB).

6.2. Skript pro hodnocení kvality příjmu ADS-B přijímače

Na začátku výpisu průběhu procesu je vypsání času spuštění a dále časy vstupů do kontrolních bodů skriptu, pro sledování průběhu v reálném čase. Tento průběh končí heslem *Statistics - DONE*, načež následují výsledné statistiky. Počínaje celkovou dobou kalkulace skriptu přes procentuální statistiky DF17 zpráv, velikost intervalu záznamu a dále k celkovým dobám průběhů různých částí skriptu až k nejdůležitějším hodnotám - úspěšností příjmu.

Tyto hodnoty počítám pomocí dvou metod:

- Metoda zprůměrování procentuálních úspěšností všech přijatých TC od detekovaných letadel.
- Metoda součtu všech reálně přijatých zpráv dělená celkovým počtem zpráv, které měly na přijímač dorazit.

Nutno zmínit, že ve skriptu se pro výpočet chybějících zpráv pracuje pouze s některými TC zprávami sestupného formátu DF17 - ADS-B. Konkrétně se jedná o zprávy obsahující identifikaci a kategorii letadla (TC1, TC2, TC3, TC4), pozemní polohu (TC5, TC6, TC7, TC8), rychlost (TC19) a vzdušnou polohu (TC9-TC18 a TC20-TC22). Tyto typy zpráv jsou totiž vysílány automaticky ve standardizovaných intervalech, specifikovaných v dokumentu RTCA DO-260B v tabulce „2-79: 1090 MHz Extended Squitter ADS-B Message Broadcast Rates“.

Transponder Register	Event-Driven Message Priority	1090ES ADS-B Message	Broadcast Rate		
			On-the-Ground, not moving	On-the-Ground and moving	Airborne
BDS 0,5	N/A	Airborne Position	N/A	N/A	2 / 1 second (0.4 – 0.6 sec)
BDS 0,6	N/A	Surface Position	LOW RATE 1 / 5 seconds (4.8 – 5.2 sec)	HIGH RATE 2 / 1 second (0.4 – 0.6 sec)	N/A
BDS 0,8	N/A	Aircraft Identification and Category	LOW RATE 1 / 10 seconds (9.8 – 10.2 sec)	HIGH RATE 1 / 5 seconds (4.8 – 5.2 sec)	HIGH RATE 1 / 5 seconds (4.8 – 5.2 sec)
BDS 0,9	N/A	Airborne Velocity	N/A	N/A	2 / 1 second (0.4 – 0.6 sec)
BDS 6,1	TCAS RA = 1 Emergency = 2	Aircraft Status (Emergency/Priority Status, Subtype=1) (TCAS RA Broadcast, Subtype=2)	TCAS RA or Mode A Code Change 0.7 – 0.9 seconds		
			No TCAS RA, No Mode A Change 4.8 – 5.2 seconds		
BDS 6,2	N/A	Target State and Status (TSS)	N/A	N/A	1.2 – 1.3 seconds
BDS 6,5	N/A	Aircraft Operational Status	4.8 – 5.2 seconds	No change NIC _{STPP} /NAC/SIL 2.4 – 2.6 seconds	TSS being broadcast or not No change TCAS/NAC/SIL/NIC _{STPP} 2.4 – 2.6 seconds
				Change in NIC _{STPP} /NAC/SIL 0.7 – 0.9 seconds	TSS being broadcast Change in TCAS/NAC/SIL/NIC _{STPP} 2.4 – 2.6 seconds
					TSS not broadcast Change in TCAS/NAC/SIL/NIC _{STPP} 0.7 – 0.9 seconds

Tabulka 6.2: RTCA DO-260B, Table 2-79 (převzato z [17])

Tento skript je schopen zpracovávat jak nahrávky z jednoho přijímače, z čehož vypočte úspěšnost příjmu konkrétního zařízení, tak nahrávky ze skupiny přijímačů, kde zjistí úspěšnost příjmu této skupiny. Z tohoto důvodu musí být všechna data před zpracováním prohledána z důvodu smazání duplicitních zpráv. Pokud zpráva přijde na oba přijímače, ponechá se pouze jedna. Při tomto procesu jsou také kontrolována data pro případné špatné, překrývající se a jinak deformované zprávy.

Pro výpočet hodnot úspěšnosti příjmu je třeba vyhledat všechny 24-bitové adresy letadel vysílajících zprávy sestupného formátu 17. Tento proces musí zkontrolovat každou přijatou zprávu z balíku zaznamenaných dat.

Detekci chybějících zpráv ve skriptu řeším pomocí ukládání času poslední přijaté zprávy (od konkrétního letadla a konkrétního TC), který je při přijetí nové zprávy odečten od času přijetí nové zprávy a tím získám časový rozdíl mezi zprávou poslední a aktuální. Pokud je rozdílový čas vyšší než limitní hodnoty, jsem schopen určit, zdali je aktuální zpráva první v pořadí za zprávou předchozí nebo jestli mezi těmito zprávami chybí jedna nebo více jiných zpráv. Detekce kolik zpráv chybí je řešena podílem mezi rozdílovým časem přijetí zpráv a limitní hodnotou časového intervalu.

Takto detekované chybějící a skutečně přijaté zprávy ze všech letadel využiji k výše popsaným metodám výpočtu kvality příjmu.

Metoda zprůměrování procentuálních úspěšností všech přijatých TC od detekovaných letadel pracuje pomocí výpočtu úspěšnosti přijetí zprávy konkrétního TC vyslané konkrétním letadlem a následného aritmetického průměru ze součtu všech takto detekovaných úspěšností přijetí zpráv specifických TC od všech letadel.

Metoda součtu všech reálně přijatých zpráv děleným celkovým počtem zpráv, které měly na přijímač dorazit, funguje pomocí podílu součtu zpráv reálně (fyzicky) přijatých se součtem těchto reálně přijatých zpráv a součtem predikovaných chybějících zpráv, což dohromady dává teoretický maximální možný počet zpráv přijatých od letadel.

Každá z těchto metod dosahuje vždy jiné přesnosti, ale obecně přesnější je metoda druhá, ve které se počítá se všemi přijatými a nepřijatými zprávami.

Tyto výpočty skript dělá jak celkové, tak na bázi intervalů vzdáleností od přijímače. To jsem zajistil pomocí ukládání poslední polohy každého detekovaného letadla, která je pak využita pro zařazení zpráv neobsahujících polohu do konkrétního intervalu vzdálenosti. S každou novou příchozí zprávou obsahující polohu se tato hodnota aktualizuje. Zprávy seřazené do vzdálenostních intervalů jsou pak zpracovány pro výpočet výsledků úspěšnosti příjmu v konkrétních intervalech vzdálenosti.

6.2. Skript pro hodnocení kvality příjmu ADS-B přijímače

Ve vypsáném příkladu vyšla procentuální úspěšnost 36.9528%, což v tomto případě znamená, že do vzdálenosti 150 km se ztratily skoro 2/3 teoreticky existujících zpráv. Je to celkem vysoká hodnota ztrátovosti příjmu pomocí fúze dat z 2 přijímačů.

Software je přiložen v příloze: vypocet_kvality_prijmu.rar

Závěr

Závěrem bych rád uvedl aktuální stav realizace multilateračního systému na Ústavu letecké dopravy Fakulty dopravní ČVUT. K měsíci květnu roku 2015 vlastní ÚLD celkem 3 přijímače. Bohužel však udělenému grantu SGS na téma „Vývoj nízkonákladového přehledového řešení pro nekritické aplikace v oblasti všeobecného letectví“ byly již v prvním roce kráceny finanční prostředky, což značně omezilo práci na projektu z důvodu nedostatku finančních prostředků pro pořízení přijímacích stanic. Samotný 3. přijímač nutný pro 2D multilateraci byl pořízen až začátkem roku 2015. Do té doby fyzicky vůbec nebylo možné jakkoli systém testovat nebo vylepšovat. Nyní se na projektu stále pracuje jak ze strany projektové výuky, tak i ze strany vlastního zájmu některých studentů.

I přes fakt, že je takovýto low-cost multilaterační systém mnohonásobně levnější než profesionální systémy, stále je jeho cena dost vysoká. Výsledkem mé kalkulace je zhruba 33.000 Kč za jednu přijímací stanic. Tato cena však obsahuje pouze samotný navrhovaný hardware. Do výsledné ceny se promítne také cena samotné instalace přijímacích stanic, cena pronájmu prostor, elektřina, doprava, atd. V případě pořízení nezávisle napájeného systému je pak pořizovací cena ještě vyšší. Bohužel návratnost takového systému je značně dlouhá, jak tomu u využití „zelené“ energie bývá a proto je solární systém pro potřeby Ústavu letecké dopravy vhodný pouze v případě, že by ulehčil instalaci přijímací stanice například do méně dostupných míst. Při využití datového přenosu přes síť internet bude takto zhotovený low-cost multilaterační systém stále velmi vzdálený profesionálnímu. Cílem případné budoucí práce by mělo být zhotovení systému co nejvíc blížícímu se vlastnostem profesionálních systémů. Za hlavní prvek takového systému považuji bezdrátové spoje. Aktuální situace přijímacích stanic je taková, že pokud přestane stanice fungovat, nezbyvá nic jiného než kontaktovat po-

skytovatele internetu. Je třeba mít celý systém kompletně ve vlastní režii. Přenos dat pomocí sítě internetu je sice nejlevnější možnost, jsou zde ale otázky, které tuto možnost oslabují. Pokud opomenou rychlost distribuce dat, která není, vzhledem k cílenému nekritickému využití, životně důležitá, myslím si, že hlavní vadou sdílení dat ve veřejné síti je samotný přístup veřejnosti do této sítě. Pokud se kdokoli dostane k IP adrese přijímací stanice ve veřejné síti internetu, není možné ho zastavit od úmyslné škodlivé činnosti na přijímači, jako jsou například DDoS útoky (Distributed Denial of Service) na přijímač, které by takovéto zařízení naprosto vyřadily z provozu, nemluvě o možném zavirování přijímací stanice.

Tímto bych chtěl apelovat na co největší využívání soukromých sítí, i za cenu vyšších pořizovacích nákladů. Nejlepší možností stavby MLAT systému, s oblastí krytí - Praha a okolí, by bylo využití směrových bezdrátových spojů do jedné centrální stanice umístěné na místě, odkud by byla na všechna místa přímá viditelnost. Z této stanice následně jedním bezdrátovým spojem až do cílové lokality, pokud by nebylo možné data vysílat do této lokality přímo. Další možností je umístění serveru virtuální soukromé sítě (VPN) do architektury redistribuční stanice a následné připojení do veřejné sítě. Tímto řešením by se využila výhoda veřejné sítě, ale díky použití šifrovaného přenosu mezi vnitřní částí redistribuční stanice a centrálním systémem by byla zajištěna bezpečnost přenosu dat a jejich neveřejnost. Pořizování VPN stanice pro každou přijímací stanici by bylo velmi nákladné.

Jako finální shrnutí práce bych rád zmínil fakt, že i přes to, že jsem zde navrhl hardwarovou strukturu multilateračního systému, je ještě nezbytné zajistit část softwarovou - výpočetní.

Dle mého názoru je stavba kompletního multilateračního systému z low-cost přijímačů nejen výzvou pro studenty, ale v případě úspěchu i pro školu, která se může takovýmto systémem prezentovat.

Literatura

- [1] ADATA Technology Co., Ltd : [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.adata.com>
- [2] Airspy.com: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://airspy.com>
- [3] Airways New Zealand: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <https://www.airways.co.nz>
- [4] ANTENI.NET Ltd.: [online], [rev. 2012], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.microadsb.com>
- [5] ASPA, a.s.: [online], [rev. 2014], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://wifi.aspa.cz>
- [6] ERA a.s.: [online], [rev. 2014], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://era.aero>
- [7] European Commission - Photovoltaic Geographical Information System: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>
- [8] Global Navigation Systems - GNS GmbH : [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.gns-gmbh.com>
- [9] Google Maps: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <https://www.google.cz>
- [10] HRŇA, L.: *Fotovoltaický systém pro ostrovní provoz*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2010.

-
- [11] Kinetic Avionics Ltd.: [online], [rev. 2012], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.kinetic-avionics.com>
- [12] KÖLLNER, G.: Mode S Beast. [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://wiki.modesbeast.com>
- [13] Ministerstvo dopravy České republiky: Letecký předpis L 10/IV - O civilní letecké telekomunikační službě - Přehledový radar a protisrážkový systém. [PDF], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10/L-10iv/data/print/L10-iv_cely.pdf
- [14] Multilateration.com: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.multilateration.com>
- [15] OvisLink Corp.: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://cz.airlive.com>
- [16] Radarspotting.com: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.radarspotting.com>
- [17] RTCA: DO-260B - Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services Broadcast (TIS-B). Technická zpráva, RTCA, prosinec 2009.
- [18] TURNER, R.: Multilateration Technology Overview. [PDF], 2007, ICAO Surveillance Seminar for the NAM/CAR/SAM Regions - 19. June 2007. Dostupné z: http://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/2007/surv_semi/Day02_SENSIS_Turner.pdf
- [19] UJCOVÁ, M.: Úloha multilaterace při zvyšování bezpečnosti letecké dopravy. *Perner's Contacts*, ročník 6, č. IV, listopad 2011: s. 400–403.
- [20] WebIOPi: [online], [rev. 2015], [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <https://code.google.com/p/webiopi>
- [21] ZACH, M.: *ADS - B a VKV přijímače pro Fakultu dopravní ČVUT*. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha, 2013.

Seznam použitých zkratk

ADS-B - Automatic dependent surveillance – broadcast - Automatický závislý přehledový systém - – vysílání

A-SMGCS - Advanced Surface Movement Guidance & Control System - Pokročilý systém navádění a kontroly pozemních pohybů

ATC - Air Traffic Control - Řízení letového provozu

ATM - Air Traffic Management - Uspořádání letového provozu

CD - Compact Disc - Kompaktní disk

CDM - Collaborative Decision Making - Společné rozhodování

CRC - Cyclic Redundancy Check - Cyklická redundantní kontrola

DC - Direct Current - Stejnoseměrný proud

DDoS - Distributed Denial of Service - Distribuované odmítnutí služby

DF - Downlink format - Formát sestupného spoje

DNS - Domain Name Server - Jmenný server

DVB - Digital Video Broadcasting - Digitální přenos videa

FEC - Forward Error Correction - Dopředná korekce chyb

FPGA - Field Programmable Gate Array - Programovatelné hradlové pole

FTP - File transfer protocol - Protokol pro přenos souborů

GNSS - Global Navigation Satellite System - Globální družicový navigační systém

GPIO - General Purpose Input/Output - Všeobecný vstup/výstup

GPS - Global Positioning System - Globální polohovací systém

HTTP - HyperText Transfer Protocol - Protokol pro přenos HyperTextu

ICAO - International Civil Aviation Organization - Mezinárodní organizace pro civilní letectví

IIS - Internetová Informační Služba

IP - Internet Protocol - Internetový protokol

IPxx - Ingress Protection Marking - Stupeň ochrany

LED - Light Emitting Diode - Svítivá dioda

MLAT - Multilaterace

NVP - Nominal Velocity of Propagation - Nominální rychlost šíření
POE - Power over Ethernet - Napájení přes Ethernet
PPS - Pulse Per Second - Pulz za sekundu
PRM - Precision Runway Monitor - Systém přesného dohledu pro přistávací dráhy
PtP - Point to Point - Přímé směrování
PVC - Polyvinylchlorid
PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System - Fotovoltaický Geografický Informační Systém
RTCA - Radio Technical Commission for Aeronautics - Radiotechnická komise pro letectví
RVSM - Reduced Vertical Separation Minima - Minima snížení vertikálního rozestupu
SDR - Software Defined Radio - Softwarem řízený přijímač
SGS - Studentská Grantová Soutěž
SSH - Secure Shell
SSR - Secondary Surveillance Radar - Sekundární přehledový radar
SUZ - Správa Účelových Zařízení
TC - Type Code - Typový kód
TDOA - Time Difference of Arrival - Časový rozdíl příjmu
ÚLD - Ústav Letecké Dopravy
UPS - Uninterruptible Power Supply - Záložní zdroj
USB - Universal Serial Bus - Univerzální sériová sběrnice
UTC - Coordinated Universal Time - Koordinovaný světový čas
UV - Ultraviolet - Ultrafialové
VKV - Velmi krátké vlny
VPN - Virtual private network - Virtuální privátní síť
WAM - Wide area multilateralation - Traťový multilaterační systém

Seznam příloh na CD

adsb-recorder-server_v2.2.rar - Software pro opakovaný záznam dat z přijímačů.

adsb-timed-recorder_v1.0.rar - Software pro vytvoření jednorázového záznamu dat z přijímačů.

vypocet_kvality_prijmu.rar - Skript pro výpočet úspěšnosti příjmu zpráv na ADS-B přijímačích.

DF_decoder_v4.rar - Dekodér Mode S zpráv.