České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

Bakalářská práce

Detekce kolizních situací pro malé civilní letouny

Štěpán Křivanec

Vedoucí práce: Ing. Milan Rollo, Ph.D.

Studijní program: Kybernetika a robotika, Bakalářský

Obor: Systémy a řízení

1. srpna 2013

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu práce Ing. Milanu Rollovi, Ph.D., za pomoc a podporu při vedení práce a za výborné pracovní podmínky, které vytváří na pracovišti svým působením. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomáši Meiserovi za věcné připomínky k formě a obsahu tištěné podoby práce, Ing. Antonínu Janečkovi za vstřícnou spolupráci při vývoji a testování, pilotům Miroslavu Rohelovi a Aleši Ferra za spolupráci při testovacích letech, Ing. Martinovi Seleckému a Mgr. Přemyslu Volfovi za pomoc při orientaci v systému Aglobe a AgentFly, Ing. Miloši Krumlovi za poskytnuté odkazy na materiály relevantní k práci, Petrovi Váňovi za poskytnuté šablony a připomínky k syntaxi LaTeXu a Michaele Dopitové za pomoc při korekci pravopisných chyb a překlepů.

Prohlášení

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

V Praze dne 1. 8. 2013 .....

Abstract

This bachelor thesis deals with a collision avoidance systems for light sport aircraft, especialy with the system based on Zaon XRX device. Detection of other aircraft in the air by the Zaon XRX device is used to develop noncooperative collision avoidance algorithm. This algorithm was implemented into the AgentFly system and its function was verified in simulation.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou malých civilních letounů a systémem prevence kolizí Zaon XRX. Detekce letounů jednotkou Zaon XRX je v této práci využita k návrhu nekooperativních predikčních algoritmů kolizních situací. Tyto algoritmy jsou implementovány v prostředí systému AgentFly a jejich charakteristiky ověřeny simulací.

Obsah

1 Úvod **1**

1.1 Cíle práce 1

1.2 Organizace práce 2

2 Současné systémy detekce a řešení kolizních situací **3**

2.1 Mechanizmy řešení kolizních situací 4

2.1.1 Kooperativní 4

2.1.2 Nekooperativní 4

2.2 Procedurální prostředky 4

2.2.1 Rozdělení vzdušného prostoru 4

2.2.2 Typologie prostorů 6

2.2.3 Letové hladiny 6

2.2.4 Letové tratě 7

2.3 Technické prostředky 8

2.3.1 Globální navigační systém (GNSS) 8

2.3.2 Radary 11

2.3.3 Odpovídače 13

2.3.4 Výstražný protisrážkový systém TCAS 16

2.3.5 Radiomajáky 16

2.4 Malé letouny 17

2.5 Problematika letů VFR 17

3 Výchozí stav problému **19**

3.1 Hardwarové prostředky 19

3.1.1 Letadla 19

3.1.2 Přístroj Glass Cockpit 20

3.1.3 Gumstix Overo Earth Storm COM 23

3.1.4 Zaon XRX 25

3.1.5 Rádiová pojítka 28

3.1.6 FLARM 29

3.2 Softwarové prostředky 30
3.2.1 Projekt AgentFly 30
3.2.2 Knihovna RXTX 32
3.2.3 Progam Piracom 33
3.2.4 Program SerialToIp 33
3.2.5 Program ser2sock 33
3.2.6 Testovací prostředí sériové komunikace 34
3.2.7 Integra komunikační software 34

4 Implementace **39**
4.1 Zasazení implementace do systému Agentfly 40
4.2 Implementace přenosových protokolů 41
4.2.1 Rozhraní Integra-Agentfly 42
4.2.2 Rozhraní Zaon-Agentfly 45
4.3 Analýza dat 46
4.3.1 Vzdálenost 47
4.3.2 Výška 47
4.3.3 Azimut 47
4.4 Predikce pohybu 47
4.4.1 Lineární predikce 48
4.4.2 Taylorova predikce 49
4.5 Detekce kolizí 51
4.5.1 Určení velikosti bezpečnostní zóny 52
4.5.2 Vliv nepřesností na detekci kolize 53
4.6 Přeplánování letového plánu 54
4.6.1 Určení velikosti dynamické bezletové zóny 55

5 Simulace **57**
5.1 Vstřícný let dvou letadel 57
5.2 Vstřícný let čtyř letadel 58
5.3 Vstřícný let deseti letadel 58

6 Závěr a budoucí práce **61**
6.1 Zhodnocení 61
6.2 Budoucí práce 62

7 Přílohy **69**
7.1 Tabulka cestovních hladin bod a) 69
7.2 Obsah přiloženého CD 71

Literatura **73**

Seznam obrázků

2.1 Rozdělení vzdušného prostoru ČR. 7
2.2 Rozšiřitelná 24-poziční konfigurace systému GPS 9
2.3 Rozmístění komponent Řídícího a kontrolního segmentu GPS systému 10
2.4 Princip potlačení bočních laloků radaru 13
2.5 Sled impulsů dotazů sekundárního radaru 14

3.1 Ilustrativní schéma architektury jednoho letounu 20
3.2 Tecnam P92 Echo Super 21
3.3 Tecnam P2002 Sierra de Luxe 22
3.4 Integra TL-6624 23
3.5 Vypočení jednotka Gumstix Overo Fire 24
3.6 Rozšiřující deska Gumstix Summit 25
3.7 Zaon XRX, Zdroj [1] 26
3.8 Vizuální zpracování rozsahů měření jednotky Zaon XRX. Detection Window-rozsah měření, Traffic Advisory a Traffic Alert jsou oblasti úrovně výstrahy pilotovi. Zdroj [1]. 27
3.9 Instalovaná jednotka Zaon XRX v kokpitu letadla používaného k testům . . . 28
3.10 Přesnost určení azimutu pro letadel Cirrus SR-22, Diamond Katana 29
3.11 Přesnost určení azimutu pro letadel PA-38 a Grumman Tiger 30
3.12 Přesnost určení azimutu pro letadel Cessna 172 a Piper Cherokee 31
3.13 Přesnost určení azimutu pro letadel Cessna 421 a Piper Seneca 32
3.14 Zobrazovací módy Screen A a Screen B jednotky Zaon XRX 32
3.15 Radiové pojítko Microhard n920F-ENC 33
3.16 Zařízení Powerflarm 33
3.17 Schéma simulovaného letadla v systému AgentFly 34
3.18 Prostředí programu Piracom 35
3.19 Prostředí programu Com0Com 35
3.20 Prostředí komunikačního software simulující protokol zařízení integra 37
3.21 Zařízení Integra TL-6624, Zaon XRX a externí jednotka GPS při jednom z testovacích letů 37

4.1 Zařízení Integra TL-6624, Zaon XRX a externí jednotka GPS při jednom z testovacích letů . . . 40
4.2 Struktura řešení kolizí v systému AgentFly. Zdroj [2] . . . 41
4.3 Struktura nekooperativního řešení kolizí v systému AgentFly. . . . 42
4.4 Dynamické bezletové zóny . . . 43
4.5 Porovnání naměřené vzdálenosti proti referenci . . . 48
4.6 Histogram absolutních hodnot odchylek detekované vzdálenosti od reference . 49
4.7 Porovnání naměřené výšky proti referenci . . . 50
4.8 Porovnání naměřeného azimutu proti referenci . . . 51
4.9 Histogram absolutních hodnot odchylek detekovaného azimutu od reference . 52

5.1 Simulace vstřícného letu dvou letadel. . . . 57
5.2 Simulace vstřícného letu čtyř letadel. . . . 58
5.3 Simulace vstřícného letu deseti letadel. . . . 59

Seznam tabulek

2.1 Tabulka limit chyby určení polohy GPS(SPS) 10
2.2 Tabulka nomenklatury kódů odpovídačů 15
2.3 Tabulka skupin bitů informačních impulsů odpovídače 15
2.4 Tabulka SIF kódů určených pro zvláštní účely 15

3.1 Technické parametry letadla P92 Echo Super 21
3.2 Technické parametry letadla P2002 Sierra de Luxe 22
3.3 Vliv vzdálenosti detekovaného letounu na přesnost měření jednotky Zaon XRX 26
3.4 Význam jednotlivých bytů packetu vysílaných jednotkou XRX 36

7.1 Tabulka cestovních hladin bod a) 70

Kapitola 1

Úvod

Civilní letecká doprava zažívá na konci 20. století prudký rozvoj. Cestování vzduchem přestalo být čímsi výjimečným a stalo se běžnou záležitostí pro milióny cestujících, kterým denně šetří čas a zkracuje vzdálenosti. Rozvíjí se všechny jeho součásti, tedy i řízení letového provozu, a technologické prvky zajišťující bezpečný provoz.

Stále se zvyšující počty letadel kladou vyšší požadavky na řízení leteckého provozu. Nárůstu poptávky po vzdušném prostoru a zvýšení jeho propustnosti se snaží řízení letového provozu vyhovět novými opatřeními. Mezi tato opatření patří otevření nových letových tras, snížení vertikálních rozestupů (Reduced Vertical Separation Minima) a další, která ale zvyšují náročnost koordinace provozu ve vzdušném prostoru a kladou vyšší požadavky na systémy zajišťující jeho bezpečnost.

Tak, jak se zvyšuje atraktivita vzdušného prostoru České republiky, zvyšuje se i počet pohybů letadel. Zatímco předpovědi ICAO[1] očekávaly v 90. letech roční nárůsty okolo 5%, roční nárůsty pohybů letadel ve vzdušném prostoru České republiky jsou pravidelně vyšší.

Současný systém koridorů a rozdělení vzdušného prostoru do tříd přestává stačit. Dynamika, s jakou se rozmáhá malé letectví od roku 1990, je nevídaná. Např. český rejstřík ultralehkých letadel registruje něco kolem 4000 letadel. Situace je obzvláště patrná na stále se zvětšujícím počtu leteckých akcí a sletů.

Současné technologie snížili cenu letounů zásadním způsobem a zpřístupnily letouny pro širší oblast. Cenová relace se již v současné době značně přibližuje ceně automobilu ve střední třídě. Očekáváme i nadále silný růst a rozvoj malého letectví.

1.1 Cíle práce

- Prozkoumání problematiky prevence kolizních situací malých civilních letounů. Seznámení se s elektronickými asistenčními zařízeními, zejména přístroji typu Glass Cocpit, odpovídači a již používanými systémy prevence kolizí - Zaon XRX a PowerFlarm.
- Implementace přenosového protokolu mezi palubním zařízením typu Glass Cocpit a externím počítačem Gumstix pomocí sériové linky.

[1] ICAO - International Civil Aviation Organization - Mezinárodní organizace pro civilní letectví

- Navržení algoritmu pro detekci kolizních situací mezi letouny na základě informací o polohách okolních letounů poskytovaných zařízením Zaon XRX.
- Ověření charakteristik navrženého algoritmu v simulaci a v reálném prostředí na dostupných letounech.

1.2 Organizace práce

Kapitola 2 popisuje současné řešení kolizních situací letadel. Kapitola je rozdělena do čtyř sekcí. Sekce 2.1 popisuje kooperativní a nekooperativní přístup řešení kolize letadel. Sekce 2.2 popisuje procedurální postupy předcházení kolizním situacím. Sekce 2.3 popisuje současně rozšířené technické prostředky předcházení a řešení kolizních situací. Sekce 2.4 poskytuje vhled do provozu malých letounů. Sekce 2.5 popisuje pravidla letu za viditelnosti.

Kapitola 3 popisuje prostředky, softwarové a hardwarové prostředky, které byly k dispozici při psaní této práce. Kapitola je rozdělena do dvou sekcí. Sekce 3.1 popisuje dostupné hardwarové prostředky a sekce 3.2 popisuje dostupné softwarové prostředky.

Kapitola 4 popisuje implementaci řešení zadání. Je rozdělena do šesti sekcí. Sekce 4.1 popisuje strukturu řešení v systému Agentfly. Sekce 4.2 popisuje implementaci přenosových protokolů. Sekce 4.3 se zabývá analýzou dat naměřených při testovacích letech. V sekcích 4.4 a 4.5 je na základě těchto dat popsán návrh algoritmu detekce kolizí. V sekci 4.6 je popsáno přeplánování letového plánu na základě detekce kolize.

Kapitola 5 se zabývá ověřením charakteristik navrženého řešení. Je rozdělena do tří sekcí. Každá sekce popisuje jiný způsob ověření funkce navrženého algoritmu. Sekce 5.1 testuje kolizi dvou letadel, sekce 5.2 kolizi čtyř letadel a kolizi deseti letadel se testuje v sekci 5.3.

Kapitola 6 vyhodnocuje dosažené výsledky a navrhuje postup budoucí práce. Sekce 6.1 hodnotí dosažené výsledky práce a návrh budoucí práce je umístěn v sekci 6.2.

Kapitola 2

Současné systémy detekce a řešení kolizních situací

V současnosti se kolizním situacím přechází systémem řídících pozemních stanic. Systém pozemních stanic monitoruje pohyb v vzdušném prostoru a poskytuje letadlům pokyny, rady a informace, čímž se předchází konfliktním situacím. Pro tento přístup se využívá označení řízení letového provozu (ŘLP)[1]. Krom přímého zásahu ŘLP je zaveden systém pravidel, které dalším způsobem přispívají k bezpečnosti provozu. Malé letouny mohou létat za pravidel letu VFR (let za viditelnosti), nebo podle pravidel IFR (let podle přístrojů). Za letu podle pravidel IFR se pilot řídí pokyny řízení letového provozu. Informace potřebné k letu IFR pilot získává z palubních navigačních zařízení. Za letu pravidel VFR se pilot spoléhá hlavně na vizuální kontakt a rádiové spojení.

Řízení letového provozu rozděluje vzdušný prostor do oblastí, tříd, tratí a prostorů. Řízení vzniklých částí vzdušného prostoru se rozděluje mezi jednotlivá střediska spadající do systému řízení letového provozu: řídící věž na letišti TWR[2], středisko přiblížení APP[3] a oblastní středisko ACC[4]. Procedurální prostředky jsou popsány v sekci 2.2.

Letadla jsou v současné době řízena především na základě kombinace informací ze sekundárního radaru zobrazovaných na obrazovce dispečerům řízení letového provozu a z informací zobrazovaných na palubě letadel interpretujících vzdálenosti a směry k pozemním radiomajákům a odchylky od sestupové a směrové roviny v konečné fázi přiblížení. Využívané technické prostředky jsou popsány v sekci 2.3.

Současný přístup k zajišťování bezpečného provozu neumožňuje optimální využívání celého letového prostoru, což je patrné zejména v blízkosti letišť a v letových prostorech bez řízení pozemním pracovištěm.

[1] ŘLP v anglickém jazyce ATC - air traffic control
[2] TWR je zkratka anglického Tower. Je označením pro řídící věž letiště, v angličtině control tower
[3] APP je zkratkou anglického approach.
[4] ACC je zkratkou anglického Area Control Centre, v češtině oblastní středisko řízení.

2.1 Mechanizmy řešení kolizních situací

Tato práce se zabývá především decentralizovaným řešením kolizních situací. Decentralizovaným v tomto kontextu znamená, že se neuvažuje s nadřazeným prvkem skupiny letounů, který má aktualizované informace o celém uvažovaném vzdušném prostoru a který by řešil hrozící kolize centrálně upravováním letových plánů jednotlivých účastníků letového provozu. Například tak, jak to činí řízení letového provozu ČR. Decentralizované mechanizmy řešení kolizních situací mohou být rozděleny do dvou kategorií. Rozdělujícím kritériem je spolupráce nebo její absence letadel uvažovaného vzdušného prostoru. Tyto dvě kategorie nesou názvy Kooperativní a Nekooperativní.

2.1.1 Kooperativní

Kooperativní řešení kolizních situací je takové, kdy dochází k spolupráci mezi všemi účastníky kolizní situace. Příkladem kooperativního řešení, je vzájemná komunikace dvou letadel za účelem úpravy současných kolizních letových plánů na nekolizní. Zde je vhodné podotknout, že do kooperativních řešení kolizních situací spadají i algoritmy, kde výslovně nedochází k aktivní komunikaci mezi letouny za účelem modifikace kolizních plánů letu. Dobrým příkladem takového předcházení kolizí je výstražný protisrážkový systém TCAS, kde se kolizním situacím předchází protokolem řešení kolizní situace. Konkrétním příkladem budiž doporučení klesání jednomu letadlu a doporučení stoupání druhému v kolizních kurzech na základě současné rotace letadel vůči zemskému magnetickému poli [3].

2.1.2 Nekooperativní

Nekooperativní řešení kolizních situací nevyužívá ani aktivní (založené na komunikaci) ani pasivní (založené na předem stanoveném protokolu řešení) kooperace při řešení kolizní situace. Takovéto algoritmy typicky monitorují pohyb nekooperujících letadel a predikují možné konfliktní scénáře na základě předpokládaných trajektorií nekooperujících letadel. Cíl nekooperativního algoritmu je nalézt takovou modifikaci vlastního letového plánu, která minimalizuje pravděpodobnost kolizní situace [3].

2.2 Procedurální prostředky

Při rozdělování vzdušného prostoru se využívá tříd, typologie, letových hladin a tratí vzdušného prostoru.

2.2.1 Rozdělení vzdušného prostoru

Třídy Vzdušného prostoru jsou definovány v 18ti dodatcích, tzv. annexech, základní dohody o vzniku ICAO. Tyto annexy definují standardy mezinárodního civilního leteckého provozu. Třídy vzdušného prostoru jsou podrobně definovány v annexu 11. Pro členské státy jsou tyto standardy doporučením, které jsou přebírány jednotlivými státy jako zákonné normy, tzv. Letecký zákon. V českém zákonodárství jsou ekvivalenty těchto annexů letecké předpisy L1 až L18 Leteckého zákona. Klasifikace vzdušných prostorů je stanovena v L11 Hlavě 2.

V České republice se používají čtyři třídy vzdušných prostorů: C,D,E a G.

Třída A Jsou povoleny jen lety IFR[5]. Všem letům se poskytuje služba řízení letového provozu a zajišťují se mezi nimi rozstupy

Třída B Jsou povoleny lety IFR a VFR[6]. Všem letům se poskytuje služba řízení letového provozu a zajišťují se mezi nimi rozstupy.

Třída C Jsou povoleny lety IFR a lety VFR. Všem letům se poskytuje služba řízení letového provozu a letům IFR se zajišťují rozstupy vůči jiným letům IFR a letům VFR. Letům VFR se zajišťují rozstupy od letů IFR a poskytují se jim informace o provozu jiných letů VFR.

Tato třída sahá od FL[7] 95 do FL 660 včetně TMA[8] Praha mimo TMA ostatních řízených letišť. Minima VMC[9] jsou stejná jako ve třídě E, od FL 100 výše stoupá požadovaná dohlednost na 8 km.

Třída D Jsou povoleny lety IFR a VFR. Všem letům se poskytuje služba řízení letového provozu, přičemž letům IFR se zajišťují rozstupy vůči jiným letům IFR a poskytují se jim informace o provozu letech VFR. Letům VFR se poskytují informace o provozu o všech ostatních letech.

Minima VMC jsou stejná jako ve třídě E, od FL 100 výše stoupá požadovaná dohlednost na 8 km.

Třída E Jsou povoleny lety IFR a lety VFR. Letům IFR se poskytuje služba řízení letového provozu a zajišťují se jim rozstupy vůči jiným letům IFR. Všem letům se poskytují informace o provozu, pokud je to proveditelné. Třída E se nesmí používat pro řízené okrsky.

Tato třída sahá od 300m AGL[10] do FL 95 mimo CTR[11] a TMA řízených letišť. Minima VMC - min. dohlednost 5 km, rozestup od oblačnosti 300m vertikálně a 1,5km horizontálně.

Třída F Jsou povoleny lety IFR a VFR. Všem letům IFR se poskytuje letová poradní služba a všem letům se na vyžádání poskytuje letová informační služba.[12]

Třída G Jsou povoleny lety IFR a VFR a všem letům se na vyžádání poskytuje letová informační služba.

Tato třída sahá od země do 300m AGL mimo CTR řízených letišť. Mimo podmínek uvedených výše jsou stanovena minima VMC - min. dohlednost 1500m (vrtulníky 800m) při

[5] Let IFR (IFR flight) Let prováděný v souladu s pravidly pro let podle přístrojů

[6] Let VFR (VFR flight) - Let prováděný v souladu s pravidly pro let za viditelnosti.

[7] Letová hladina, anglicky Flight level (FL), je hladina konstantního atmosférického tlaku, vztažená ke stanovenému základnímu údaji tlaku 1013,2 hektopascalů (hPa) a oddělená od ostatních takových hladin stanovenými tlakovými intervaly.[4]

[8] Koncová řízená oblast (angl. Terminal Control Area nebo Terminal Maneuvering Area, zkratka TMA) je část vzdušného prostoru v okolí letiště, která slouží k ochraně přibližujících se a odlétajících letadel.

[9] VMC je zkratka pro anglické visual meteorological conditions, český termín je meteorologická minima. Jde o soupis kritérií, používaných za letů VFR, při kterých mají piloti dostatečnou viditelnost pro udržení dostatečného odstupu od ostatních letadel, letounů a země. Přesná kritéria se liší podle třídy vzdušného prostoru, zda je den, či noc a podle jednotlivých států.

[10] AGV je zkratka pro anglické above ground level, do češtiny se překládá jako výška nad zemí

[11] CRT zkratka pro anglické Control Zone, v překladu řízený okrsek. Je výraz pro úsek vzdušného prostoru obvykle ve tvaru válce v těsném okolí letiště s řízeným provozem. Slouží k ochraně provozu na letištích a letadel letících po okruhu.

[12] Poznámka: Kde je zavedena letová poradní služba, uvažuje se zpravidla jako přechodné opatření pouze do doby, než bude nahrazena řízením letového provozu (viz také Předpis L 4444, Hlava 9).

dodržení poměru rychlosti a dohlednosti 100:1, let vně oblačnosti za viditelnosti země. Tato VMC jsou platná pouze v ČR.

Z hlediska pohybu ve vzdušném prostoru můžeme tyto třídy rozdělit do dvou skupin, řízené a neřízené. V České republice jsou řízenými prostory prostory C, D a E. Neřízeným prostorem v ČR je prostor G.

2.2.2 Typologie prostorů

Letová informační oblast - FIR z anglického flight information region. FIR je nejvyšším druhem prostoru ze všech. V ČR zahrnuje FIR Praha veškerý český vzdušný prostor, v rozlehlejších státech může být stanoveno více FIRů [1]. Je-li FIR rozdělen horizontálně na nižší a horní část, vyšší část se označuje UIR (Upper Information Region). Každá část atmosféry přináleží do některého FIR, prostor nad mezinárodními vodami spadá do působnosti přilehlých FIRů. Hranice FIR jsou stanoveny mezinárodními dohodami v rámci ICAO.

Identifikační pásmo protivzdušné obrany - ADIZ z anglického air defence identification zone. ADIZ je pásmo kolem hranic ve kterém je omezen provoz a které slouží potřebám protivzdušné obrany státu. V ČR sahalo pásmo ADIZ od 5 km od hranic do vnitrozemí, ale v souvislosti s evropskou integrací zaniklo v dubnu 2008.

Řízený okrsek - CTR z anglického control zone. CTR je část vzdušného prostoru v těsném okolí letiště. Slouží k ochraně letadel letících v blízkosti letiště. Spodní hranici vždy tvoří zemský povrch. Na CTR zpravidla navazuje koncová řízená oblast. Horizontální rozsah je 9 až 20 km (nejvíce ve směru vzletové a přistávací dráhy). Provoz v CTR je řízen řídící věží (stanoviště TWR).

V ČR jsou CTR vzdušný prostor třídy D. Letadla v CTR jsou předmětem letového povolení a musí udržovat spojení s orgány ŘLP.

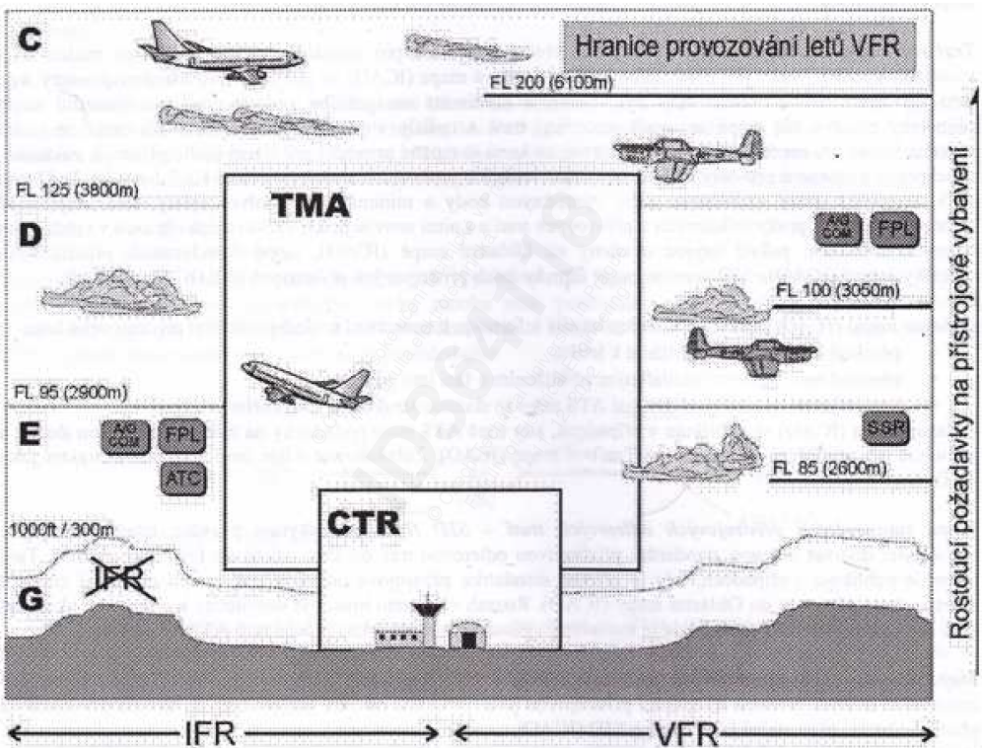
Koncová řízená oblast - TMA z anglického Terminal Control Area nebo Terminal Maneuvering Area. TMA je část vzdušného prostoru v okolí letiště, který slouží k ochraně přibližujících se a odlétajících letadel.

V ČR je spodní hranice koncové řídící oblasti obvykle ve výšce cca 300 m (1000 ft) nad terénem a horní cca 3800 m nad mořem (letová hladina FL 125); v případě Letiště Praha-Ruzyně je to cca 4400 m (FL 145).

2.2.3 Letové hladiny

Pro usnadnění řízení letového provozu se vzdušný prostor v současnosti rozděluje do letových hladin, které se pak využívají jako diskrétní hladiny výšky, na kterých se letouny pohybují.
Letová hladina[13] je hladina konstantního atmosférického tlaku, vztažená ke stanovenému základnímu údaji tlaku 1013,2 hektopascalů (hPa) a oddělená od ostatních takových hladin stanovenými tlakovými intervaly.
ICAO definuje čtyři tabulky cestovních hladin. V České republice se uplatňuje pouze tabulka cestovních hladin bod a)[4]. Letové hladiny se přiřazují podle geografického směru letu viz tabulka přílohy 7.1.

[13] Letová hladina anglicky Flight level, používaná zkratka FL



Obrázek 2.1: Rozdělení vzdušného prostoru ČR. Zdroj [5]

2.2.4 Letové tratě

Letové tratě (také letová cesta, nebo trať ATS[14], v angličtině Airway nebo ATS route) je řízená oblast ve formě koridoru. Zpravidla je vytyčena mezi body vyjádřené výškou a zeměpisnými souřadnicemi. Letové tratě jsou popsány jako sekvence bodů a povolených letových hladin. Ke každé letové trati navíc přísluší informace o časové a směrové použitelnosti. Dodržování pravidel pro jednotlivé letové tratě zajišťuje bezpečné rozestupy letadel.

Letové tratě se mohou spojovat, nebo křížit. Bod přechodu letadla z jedné tratě do druhé je právě v bodu křížení. Letové tratě navazují na příletové tratě STAR[15] a odletové tratě SID[16]. STAR a SID jsou standardní tratě v TMA[17] oblasti letišť.

Použitím letových tratí se zajišťují bezpečné odstupy mezi letadly a oddělení letadel letících podle pravidel IFR od vojenských.

K přiblížení se k bodům vytyčujících letové tratě se používají navigační majáky (taktéž radiomajáky). Radiomajáky jsou popsány v sekci 2.3.5.

[14] ATS je zkratkou anglického air traffic services, v češtině letové provozní služby
[15] STAR zkratka anglického Standard Arrival Route, v češtině standardní příletová trať podle přístrojů
[16] SID zkratka anglického Standard Instrument Departure, v češtině standardní přístrojový odlet
[17] Koncová řízená oblast (angl. Terminal Control Area nebo Terminal Maneuvering Area, zkratka TMA) je část vzdušného prostoru v okolí letiště, která slouží k ochraně přibližujících se a odlétajících letadel.

2.3 Technické prostředky

V této sekci jsou popsány moderní technické prostředky, které se přímo nebo nepřímo podílejí na prevenci kolize letounů. Je o systém globálního pozičního systému, radary, k nim příslušící odpovídače a technologicky podobný systém TCAS a radiomajáky.

2.3.1 Globální navigační systém (GNSS)

GNSS je celosvětový systém pro určování polohy a času, který zahrnuje konstelaci jedné nebo více družic, letadlových přijímačů a monitorování integrity systému. Tento systém je velice rozšířený. Využívá se, je-li to nezbytné, k podpoře požadované navigační přesnosti pro určitý provoz [4]. V současné době jsou dostupné dva, pro účely aviatiky vyhovující globální navigační systémy: GLONASS a GPS.

GLONASS

Globální navigační systém GLONASS (Global navigation satellite system) je družicový navigační systém provozovaný Ruskou federací[4].

GPS

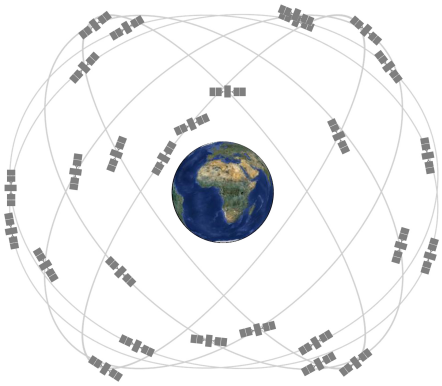
Globglobální družicový stytém GPS (Global positioning system) je družicový navigační systém provozovaný Spojenými státy americkými, respektive Ministerstvem obrany Spojených států amerických. Tento systém poskytuje letounům vybaveným přijímačem GPS informace o jejich poloze a času.

Systém GPS má v této práci kritický význam. Budem se mu tedy věnovat podrobněji. Projekt navazuje na předchozí GNSS Transit (NAVSAT)[18]. NAVSAT je historicky prvním družicovým polohovým systémem, byl provozovaný mezi léty 1964-1996 vojenským námořnictvem USA. Přesnost systému NAVSAT byla v řádu stovek metrů, která byla později zvyšována až na desítky metrů a byl uvolněn i pro civilní uživatele. NAVSAT byl ukončen a plně nahrazen systémem GPS roku 1996 [6],[7].Struktura GPS systému se dělí do tří segmentů: kosmický, řídící a kontrolní a uživatelský.

Kosmický segment se skládá ze sytému vesmírných družic, který poskytuje dostupnost 24 GPS satelitů po 95% času. V současné době systém GPS používá mezní počet 31 satelitů plus 3-4 satelity vyřazené z provozu, které plní záložní funkci a mohou být znovu aktivované v případě potřeby. GPS satelity obíhají přibližně ve výšce 20 200km nad povrchem Země na 6 drahách se sklonem 55 stupňů. Dráhy satelitů jsou vzájemně posunuty o 60 stupňů. Původně byly na drahách rozmístěny 4 satelity v pravidelných rozestupech. V současnosti se na drachách pohybuje 5 až 6 satelitů s nepravidelnými rozestupy. Původní systém 24 satelitů byl rozšířen v roce 2011 o další satelity, které mohou zvýšit přesnost činnosti GPS systému, ale nejsou považovány za součást jádra systému [7], [8]. Obrázek č. 2.2 Kosmického segmentu GPS je dispropoční a má pouze ilustrační charakter.

Řídící a kontrolní segment se skládá z globální sítě pozemních stanic, které sledují GPS satelity, monitorují jejich provoz, provádí analýzy chodu, zasílají povely družicím, řídí

[18]NAVSAT je zkratka anglického Navy Navigation Satellite System



Obrázek 2.2: Rozšiřitelná 24-poziční konfigurace systému GPS zdroj: [7]

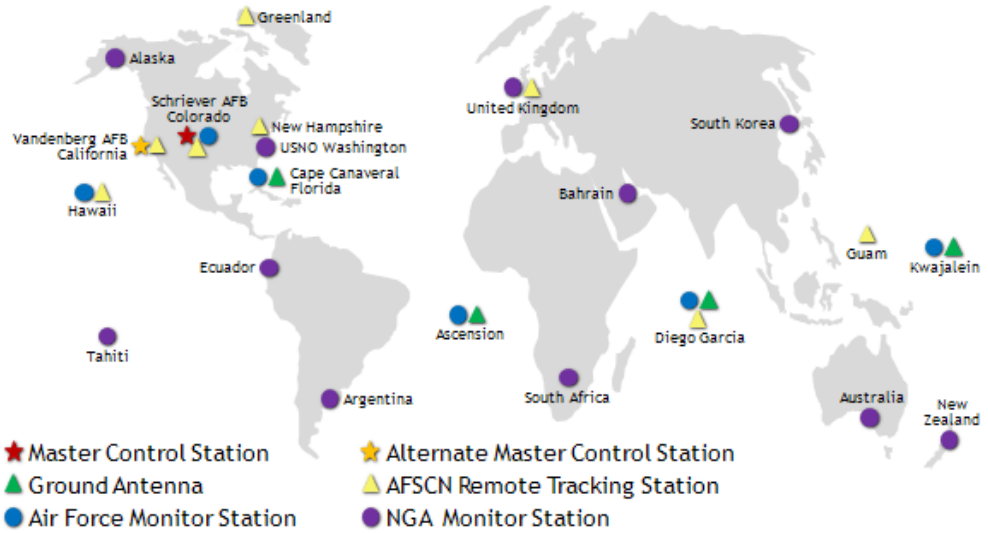
jejich manévry a provádějí údržbu atomových hodin. Řídící a kontrolní segment se sestává z následujících částí:

- **Řídicí středisko** (anglicky Master Control Station - MCS), na Schrieverově letecké základně USAF v Colorado Springs, 2nd Space Operations Sq. Záložní řídící středisko (BMCS, Backup Master Control Station) umístěné v Gaithersburg (Meryland, USA)
- **Alternativní řídící středisko** (anglicky Alternate Master Control Station) Navstar Headquarters na letecké základně Los Angeles v Californii v USA.
- **4 povelové stanice** (Ground Antenna), které jsou umístěny na základnách USAF: Kwajalein, Diego Garcia, Ascension Island a Cape Canaveral.
- **16 monitorovacích stanic** (Monitor Stations) 6 monitorovacích stanic, které jsou umístěny na základnách USAF[19] a 10 na základnách NGA[20] (National Geospatial-Intelligence Agency)

Kontrolní řídící segment také komunikuje s uživateli GPS segmetu pomocí zpráv GPS NANU (Notice Advisory to NAVSTAR Users), kde zveřejňuje plánované odstávky družic, závady, stažení nebo uvedení družice do provozu. Celosvětové rozmístění komponent Kontrolního řídícího segmentu je vyobrazen na obrázku 2.3.

Uživatelský segment se skládá z uživatelských zařízení - GPS přijímačů. GPS přijímače přijímají signály z jednotlivých družic, které jsou v daném okamžiku nad obzorem. GPS přijímače pak vypočítávají na základě přijatých znalosti o poloze jednotlivých družic a jejich časových značek polohu. Kromě polohy poskytuje systém GPS informaci o přesném času. GPS přijímače jsou pasivní, komunikace probíhá pouze jednosměrně a to směrem od satelitů k přijímači. V současnosti jsou k dispozici jednofrekvenční, dvoufrekvenční a připravují se vícefrekvenční přijímače. Dvou a vícefrekvenční přijímání je přístupné pouze autorizovaným uživatelům a vyznačuje se větší přesností určení času a polohy.

[19] Letectvo Spojených států amerických (anglicky United States Air Force; USAF)
[20] NGA je agentura spadající pod ministerstvo obrany Spojených států amerických



Obrázek 2.3: Rozmístění komponent Řídícího a kontrolního segmentu.
zdroj:[7]

	Celosvětový průměr 95% času	Nejhorší místo 95% času
Chyba horizontální polohy	13 m (43 ft)	36 m (118 ft)
Chyba vertikální polohy	22 m (72 ft)	77 m (253 ft)

Tabulka 2.1: Tabulka limit chyby určení polohy GPS(SPS).
zdroj[4]

GPS přijímače se liší principem výpočtu pozice. Druhy výpočtů pozice jsou dva kódový a fázový, přičemž fázový se využívá pouze v kombinaci s fázovým. Běžně dostupné přijímače se vyrábí jako jednofrekvenční a kódové.
Poskytované služby určovnání polohy:

- **Služba standardního určování polohy SPS**

  SPS je zkratkou pro anglický název Standard Positioning Service. Služba standardního určování polohy je určena především pro civilní sektor. SPS je Specifikovaná úroveň přesnosti určování polohy, rychlosti a měření času dostupná pro jakéhokoli uživatele GPS na celosvětové bázi. Pro dekódování signálu SPS využívá C/A kódu. SPS signál je modulován s binárním fázovým klíčováním (BPSK) a pseudonáhodným šumem (PRN) 1,023 MHz kódu pro hrubé měření (C/A). C/A kódová posloupnost je opakována každou milisekundu. Přenášená PRN kódová posloupnost je součtem Modulo-2 navigační zprávy o rychlosti 50 bitů za sekundu a C/A kódu. SPS podporuje oblasti pokrytí na Zemi, která se rozkládá od zemského povrchu až do výšky 3 000 km[4].
  Chyba určení polohy služby standardního určování polohy GPS (SPS) nemá přesáhnout limity uvedené v tabulce 2.1.

  Chyba přenosu času služby standardního určování polohy GPS(SPS) nepřesáhne 40

nanosekund 95% času.

- **Služba přesného určování polohy PPS**

  PPS je zkratka pro anglický název Precise Positioning Service. Služba přesného určování polohy oproti službě standardního určování polohy dosahuje větší přesnosti. Přesnost signálu je stejná jako při službě standardního určování polohy (SPS). Rozdíl je v tom, že služba standardního určování polohy využívá pouze jedné frekvence zatímco služba přesného určování polohy využívá frekvencí dvou. Díky tomuto jsou uživatelské systémy služby přesného určování polohy schopné provést korekci chyby způsobené degradací signálu způsobené zemskou ionosférou.

2.3.2 Radary

Radar[21] je elektronický asistenční přístroj používaný především v avionice určený k zaměření a určení vzdálenosti objektů zpravidla pomocí velmi krátkých elektromagnetických vln, některé radary rovněž k identifikaci letadla. Radary se podle vysílání elektromagnetických signálů dělí na pasivní a aktivní.

Pasivní radary, nevysílají elektromagnetické impulzy. Pouze sledují rádiovou komunikaci letadla, elektromagnetické rušení a vyzařování způsobené motorem nebo motory letadla.

Aktivní radary lokalizují letadla pomocí vysílání krátkých elektromagnetických vln a naslouchání odrazům od letadel, mraků a dalších objektů. Aktivní radary lze dále rozdělit do dvou skupin, primární radary a sekundární radary.

Primární radar je klasický aktivní radar, vysílá impulzy, nebo vlny a následně naslouchá odrazům. Pro primární radar je toto jedinou informací a obsluha radaru získává informace o vzdálenosti a azimutu letadla.

Sekundární radar, též Sekundární přehledový radar, v anglickém jazyce secondary surveillance radar (SSR). Sekundární přehledový radar je systém přehledového radaru, který využívá dotazovačů a odpovídačů[22].

Dotazovač je neodlučným zařízením systému sekundárního radaru. Dotazovač moduluje sinál radaru tak, aby formuloval jeden z definovaných módů dotazu.

Odpovídač je rovněž neodlučným prvkem systému sekundárního radaru. Odpovídač je umístěn na palubě letadla a v případě zachycení dotazovacího signálu odpovídá odpovědí shodného módu s dotazem. Více o odpovídači v sekci 2.3.3.

Podle Leteckých předpisů Leteckého zákona musí být Střední kmitočet dotazovacího a řídícího vysílání 1 030 MHz s kmitočtovou tolerancí ± 0,2 MHz. Střední kmitočty řídícího vysílání a každého vysílání dotazovacích impulsů se nesmí navzájem lišit o více než 0,2 MHz.

Standardní dotaz sekundárního přehledového radaru v normě ICAO má podobu třech impulsů s definovanými časovými prodlevami pro jednotlivé módy.

- **Dotaz módu 1** Prodleva mezi 1. a 3. impulsem je 3±1 mikrosekund. Tento mód je určen pro vojenské operace. Je tedy pro nás irelevantní a nadále se jím v této práci nebudeme zabývat.

[21] Radar je taktéž označován jako Radiolokátor

[22] Odpovídač je anglickém jazyce označován jako transponder

- **Dotaz módu 2** Prodleva mezi 1. a 3. impulsem je 5±0,2 mikrosekund. Tento mód je rovněž používán pro vojenské operace a taktéž se jím nadále v této práci nebudeme zabývat.

- **Dotaz módu 3/A** Prodleva mezi 1. a 3. impulsem je 8±0,2 mikrosekund. Tento mód se používá k získání odpovědi odpovídače pro identifikaci a sledování. Používá se takzvaných SIF kódů (Selective identification feature). Kód SIF je čtyřmístné identifikační číslo rovněž označováno jako squawk nebo alfa vyjádřené v osmičkové soustavě. Tudíž nejnižší možná hodnota SIF kódu je 0000 a nejvyšší je 7777. Číslo skládající se z čtyř osmičkových číslic může vyjadřovat 4096 různých alfa kódů. Squawk kód je letadlu přidělen v průběhu letu orgánem řízení letového provozu. Nastavován je manuálně posádkou letadla.

- **Dotaz módu B** Prodleva mezi 1. a 3. impulsem je 17±0,2 mikrosekund.Tento mód je určen k řízení letového provozu. Celosvětově není využíván.

- **Dotaz módu C** Prodleva mezi 1. a 3. impulsem je 21±0,2 mikrosekund. Tento mód se používá pro automatické předání tlakové výšky, identifikaci a sledování.

- **Dotaz módu D** Prodleva mezi 1. a 3. impulsem je 25±0,2 mikrosekund. Tento mód je určen pro budoucí použití a v současnosti se nepoužívá.

- **Všeobecný dotaz A/C/S** Účelem je získat odpovědi odpovídačů A/C a zjistit odpovídače módu S.

- **Všeobecný dotaz pouze A/C** Účelem získat odpovědi odpovídačů A/C. Odpovídače módu S neodpovídají.

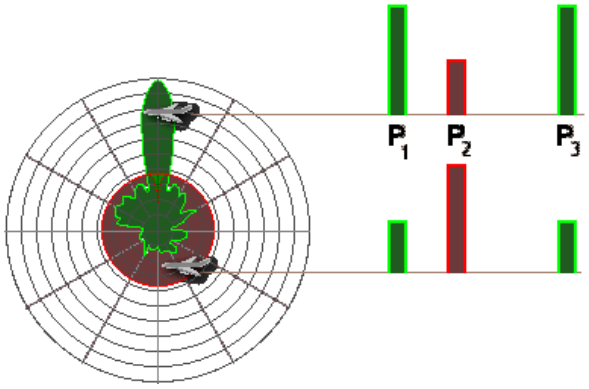
- **Dotaz módu S** má tři podmódy dotazu s použitím:
  a) Všeobecný dotaz: získat odpovědi pro zjištění odpovídačů módu S.
  b)Vysílání: vysílání informací všem odpovídačům módu S. Nezískávají se odpovědi.
  c)Selektivní vysílání: pro sledování a komunikaci s jednotlivými odpovídači módu S. Každý dotaz vyvolá odpověď pouze z odpovídače s konkrétní jedinou adresou, který byl určen v dotazu.

  Pro určené kategorie letadel v určených vzdušných prostorech je předepsáno vybavení odpovídačem v módu S / EHS (Enhanced Surveillance - zdokonalený přehled). V tomto rozšířeném módu jsou z letadla po dotazu sekundárního radaru automaticky předávány do pozemního zařízení další údaje: magnetický (kompasový) kurz letu, indikovaná rychlost letu, svislá rychlost (klesání/stoupání), úhel příčného náklonu, rychlost změny traťového úhlu (otáčení do zatáčky), skutečný traťový úhel (proti zemi), traťová rychlost, zvolená výška letu (na voliči autopilota nebo výstražné soustavy dodržování letové hladiny). Tyto údaje pak umožňují další zpracování v pozemních soustavách ŘLP např. pro výstrahu před možnými kolizemi letadel.

Odpovídače módu A/C jsou dotazem módu S potlačeny a neodpovídají. Existuje 25 možných formátů dotazů a 25 možných formátů odpovědí módu S. Odpovídač typu S je nejdražším typem odpovídače. Protože odpovídače typu S s touto prací přímo nesouvisí nebudeme se jimi dále v této práci zabývat.

Jednotlivé módy jsou odpovídači identifikovány na základě šířky a časových rozestupů jednotlivých impulsů. Pro módy A a C musí být interval mezi pulsy 1 a 2 2,0±0,15 mikrosekund. Šířka impulsů 1,2 a 3 je stanovena na 0,8±0,1 mikrosekund. Doba trvání náběžné hrany impulsů 1,2 a 3 musí být v rozmezí 0,05 až 0,1 mikrosekund. Doba trvání závěrné hrany impulsů 1,2 a 3 musí být v rozmezí 0,05 až 0,2 mikrosekund. Na obrázku 2.5 je vyobrazen sled impulsů dotazu módů A,C a S.

Pozemní stanice radaru nevyzařuje dokonale v jednom směru. Zachytí-li letadlo dotaz z postranního vyzařování, vyhodnotí ho jako validní dotaz a odpoví na něj. Tyto odpovědi ale nelze odlišit od validních odpovědí a obdržení takovéto odpovědi pozemní stanicí dá vzniknout špatnému určení pozice. Tento problém řeší systém SLS (sidelobe supresion) - potlačení bočních laloků vysílače. SLS to řeší přidáním druhého vysílače, který je všesměrový, který výkonem předčí postranní laloky, ale nikoliv hlavní lalok vyzařování. Tento vysílač vyšle signál 2 mikrosekundy po prvním impulsu. Odpovídač, který přijme nestandardní druhý impuls, dotaz vyhodnotí jako neplatný a neodpoví. Princip potlačení bočních laloků radaru SLS ilustrují obrázky 2.4 a 2.5.



Obrázek 2.4: Princip potlačení bočních laloků radaru

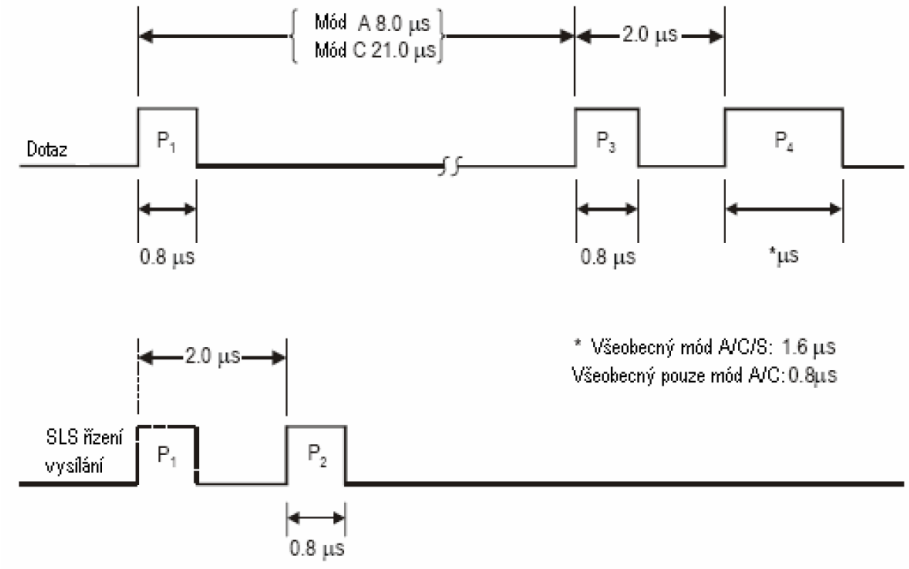
2.3.3 Odpovídače

Odpovídače, taktéž odpovídače SSR, Transpondéry, jsou zařízení systému sekundárního radaru. Tato zařízení jsou umístěna na palubách letadel a na předem definovaný dotaz radarem (viz sekce 2.3.2) automaticky odpovídají předepsanou odpovědí.

V Leteckých předpisech Leteckého zákona je uvedeno, že "Všechna letadla provádějící traťový let musí být vybavena a mít v provozu odpovídač SSR v módu A a C nebo módu S. Traťový let je let vně CTR, nebo kde CRT není zřízeno, let do vzdálenosti větší než 10 NM od vztažného bodu leťiště [4].

V sekci o radarech (2.3.2) jsme se zmínili o všech módech systému sekundárního radaru. V této sekci se budeme zabývat pouze těmi, které jsou pro tuto práci bezsprostředně relevantní. Tedy módy A a C.

Letecké předpisy Leteckého zákona určují, že střední kmitočet odpovídacího vysílání musí být 1 090 MHz Kmitočtová tolerance musí být ±3 MHz.



Obrázek 2.5: Sled impulsů vybraných dotazů sekundárního radaru
Zdroj:[4]

Odpovědi módů A a C je série impulsů rozdělených do dvou skupin: Informační impulsy a Bránové impulsy.

Informační impulsy

Informační impulsy se používají při vysílání informací odpovídačem po přijetí dotazu. Zakódovaná informace je čtyřciferné číslo v osmičkové soustavě. Nejnižší možná hodnota tohoto číselného vyjádření je 0000 a nejvyšší je 7777. Tímto způsobem jsme schopni vyjádřit 4096 různých hodnot. Hodnoty jednotlivých číslic jsou zakódované ve skupinách bitů použitím kladného dvojkového zápisu a první vyslaný bit je bit nejvyššího významu (MSB).[23] Přiřazení skupin bitů zakódované číslici je vyobrazeno v tabulce nomenklatury kódů odpovídačů 2.2. Časová posloupnost skupin bitů informačních impulzů je zachycena v tabulce 2.3 skupin bitů informačních impulsů odpovídače.

Poloha impulsu X se nepoužívá v odpovědích na dotazy módu A nebo C, a je definována pouze jako technická norma pro zajištění možného budoucího rozšíření systému. Avšak bylo rozhodnuto, že takovéhoto rozšíření by mělo být docíleno prostřednictvím využití módu S. Přítomnost impulsu v poloze impulsu X je některými státy používána pro zneplatnění odpovědi.

Bránové impulsy

Bránové impulsy uvozují impulsy informační. Bránové impulsy jsou vzdálené 20,3 mikrosekund, které tak současně tvoří nejjednodušší kód. Informační impulsy musí být od prvního

[23]MSB je zkratka anglického most significant bit - bit nejvyššího významu

ČÍSLICE	*SKUPINA IMPULSŮ*
První (nejvýznamnější)	A
Druhá	B
Třetí	C
Čtvrtá	D

Tabulka 2.2: Tabulka nomenklatury kódů odpovídačů

Impulsy:	Poloha (μs):
C_1	1,45
A_1	2,90
C_2	4,35
A_2	5,80
C_4	7,25
A_4	8,70
X	10,15
B_1	11,60
D_1	13,05
B_2	14,50
D_2	15,95
B_4	17,40
D_4	18,85

Tabulka 2.3: Tabulka skupin bitů informačních impulsů odpovídače

bránového impulsu rozmístěny ve vzdálenostech po 1,45 mikrosekundách až do druhého bránového impulsu.

Módy odpovědí

- **Odpověď módu A** Odpověď typu A obsahuje identifikační kód SIF (Selective identification feature), pro který se používají další názvy squawk a alfa. Odpověď na dotaz módu A se dále musí sestávat ze dvou bránových impulsů.

  SIF kódy pro zvláštní účely jsou uvedeny v tabulce 2.4

kód	význam
7700	označení letadla v tísni
7600	označení letadla s poruchou rádiového spojení
7500	označení letadla, které je předmětem nezákonného vměšování. (únos)
2000	vyhrazen letadlo nedostalo od ŘLP pokyn pro činnost odpovídače
0000	tento kód by měl být rezervován jako kód pro všeobecné účely

Tabulka 2.4: Tabulka SIF kódů určených pro zvláštní účely
Zdroj[4]

- **Odpověď módu C** obsahuje identifikační kód SIF/squawk/alfa právě tak, jako v odpovědi módu A. Odpověď módu C navíc obsahuje údaj o tlakové výšce letadla. Tlaková výška se podle normy ICAO udává v itervalech po 100 stopách v rozsahu od -1000 až po 126750 stop

2.3.4 Výstražný protisrážkový systém TCAS

TCAS je zkratkou anglického Traffic collision avoidance system. Výstražný protisrážkový systém je systém využívající sekundárního radarového systému určení polohy letadel ve vzdušném prostoru. V současné době je povinným vybavením všech komerčních letadel s možným počtem přepravovaných pasažérů větším než 30 [4]. Letadla vybavené aktivním systémem TCAS zjišťují azimut, vzdálenost a letovou hladinu letounů ve svém okolí pomocí systému sekundárního radaru blíže popsaném v sekcích 2.3.2 a 2.3.3.

2.3.5 Radiomajáky

Radiomajáky jsou technické prostředky, které usnadňují navigaci po letové trati nebo navigaci ke vzdáleným cílům jako jsou například letiště. Radiomajáky vysílají signál, který je vyhodnocován příslušným palubním zařízením na palubě letounu. Posádka je pak informována o směru a v některých případech i vzdálenosti vůči konkrétnímu bodu. V této sekci jsou popsány radiomajáky VOR, ILS, VKV, NBD, UKV, ADF a MLS.

Radiomaják (VOR[24]) je VKV všesměrový radiomaják. Radiomajáky jsou součástí současného řešení řízení letového provozu. Tento systém podává informace pilotovi o směru vůči konkrétnímu radiomajáku. Charakteristikou tohoto technologicky zastaralého systému je omezená přesnost navádění, která je závislá na vzdálenosti od radiomajáku.
Radiomajáky se v současnosti využívají k budování systému leteckých koridorů s předem stanovenou cestovní rychlostí a časovými rozestupy.

Přibližovací majáky ILS. ILS je zkratka anglického Instrument Landing System. ILS je asistenční přistávací systém. Systém je tvořen soustavou dvou majáků: Kursovým a sestupovým. Kursový maják pracuje na frekvencích 108,00 až 111,95MHz a vytváří svislou navigační rovinu. Sestupový maják pracuje na frekvencích 328-335 MHz a vytáří nakloněnou přistávací rovinu. Dosah vysílače je 45 km. Systém indikuje odchylku od osy průniku sestupové a kursové roviny.

VKV traťová rádiová návěštidla jsou součástí ILS systému. Vyznačují vzdálenosti při konečném přiblížení(přistání). Pracují na frekvenci 75MHz a používají se k indikaci vzdáleností 7200, 1050 a 75m od přistávací dráhy.

Nesměrové majáky NDB. NBD je zkratka anglického non directional beacon. Používá se v letecké a námořní navigaci. Tento systém lze využít pro let po trati - přílet k majáku, určení polohy v prostoru křížovým zaměřením a k přístrojovému přiblížení na přistání.

UKV meřič vzdáleností (DME). DME je zkratka anglického Distance Measuring Equipment. DME je UKV měřič vzdálenosti, využívá se pro navigaci po trati a určení vzdálenosti letadla od zdroje pozemního záření - zpravidla stanice na letišti a letových cestách. Palubní zařízení-dotazovač vytváří dvojice dotazovacích impulzů. Pracuje na frakvencích

[24] VOR - VHF Omnidirectional Radio Range, v češtině VKV všesměrový radiomaják

962-1213MHz. Vysílač vysílá identifikační signál kódovaný v morseově abecedě. Pozemní stanice signál zpozdí o 50 mikrosekund a odpoví dvojicí impulsů se stejným kmitočtem jako měly původní dotazovací signály. Palubní zařízení přijaté signály vyhodnotí a informuje posádku letadla o přímé vzdálenosti mezi letadlem a pozemní stanicí.

Palubní radiokompas (ADF) je systém, který indikuje kursový úhel k pozemní stanici ADF. Úhel je počítán od podélné osy letadla k pozemní stanici ve směru hodinových ručiček.

Mikrovlnný přistávací systém MLS. MLS je zkratka anglického microwave landing system. Systém byl původně vyvinutý za účelem nahrazení nebo doplnění systému ILS. Systém MLS má oproti systému ILS možnost volby z více kanálů, lze tak předejít interferencím s dalšími stanicemi, na letišti zabírá výrazně méně místa a podává stabilní výsledky za každého počasí.

2.4 Malé letouny

Protisrážkové systémy jsou podle leteckých předpisů vyžadovány pro letouny s posádkou přesahující třicet členů. Letouny s touto kapacitou již nepatří do klasifikace malých letounů. Piloti malých letounů jsou odkázáni na domluvu s řízením letového provozu v řízených oblastech a na domluvu po rádiovém spojení v oblastech neřízených. K dispozici jsou také přístroje přiblížení. Tyto ale problém kolizí neřeší.

Na trhu existuje několik systémů výstrahy určené pro malé letouny, které upozorňují posádku letounu o okolním provozu. Tyto se stávají s přibývající hustotou provozu čím dál populárnější. Leteckými předpisy nicméně nejsou vyžadovány.

Malé letouny létají za pravidel letu VFR nebo IFR. Lety IFR tedy let podle přístrojů se používá při letu po vytyčené trati, která je řízena řízením letového provozu. Ten zajišťuje dostatečné rozestupy mezi letouny a předchází tak kolizím. Let podle pravidel VFR, tedy let za viditelnosti není řízen řízením letového provozu a vzniká tak nebezpečí kolizních situací.

2.5 Problematika letů VFR

Pravidla letů VFR jsou upravována Leteckým zákonem.

S výjimkou zvláštních letů VFR[25] se lety VFR musí provádět tak, aby letadlo letělo při dohlednosti a ve vzdálenosti od oblaků stejné nebo větší, než je stanoveno v tabulce 7.1.

Zvláštní lety VFR se smí provádět pouze v řízeném okrsku, ve dne, vně oblaků za stálé viditelnosti země a při minimální přízemní i letové dohlednosti 1 500 m (800 m pro vrtulníky). Požadavky na denní dobu a minimální přízemní dohlednost se neuplatňují pro vrtulníkovou leteckou záchrannou službu (HEMS) a lety Policie ČR.

S výjimkou, kdy je získáno povolení od stanoviště řízení letového provozu, lety VFR nesmí vzlétat nebo přistávat na letišti v řízeném okrsku nebo vstupovat do provozního okruhu nebo okrsku letiště: a) jestliže je základna nejnižší význačné oblačnosti nižší než 450 m (1 500 ft); nebo b) jestliže je přízemní dohlednost nižší než 5 km.

[25] Zvláštní let VFR (Special VFR flight) - Let VFR, kterému vydala služba řízení letového provozu povolení k letu v řízeném okrsku v meteorologických podmínkách horších než VMC.

Lety VFR nad FL 195 do FL 285 včetně, musí být prováděny a) uvnitř dočasně vyhrazeného nebo omezeného prostoru, nebo b) v souladu s povolením a podmínkami vydanými Řízením letového provozu ČR, s.p., nebo přímo ACC Praha.

Lety VFR nad FL 285 musí být prováděny pouze uvnitř dočasně vyhrazeného nebo omezeného prostoru.

Součástí rozhodnutí o přidělení dočasně vyhrazeného nebo omezeného prostoru může být stanovení dodatečných postupů a podmínek pro jeho využívání.

S výjimkou vzletu a přistání nebo s výjimkou povolení vydaného Úřadem pro civilní letectví nesmí být let VFR prováděn a) nad hustě zastavěnými místy (města, vesnice a jiná obydlená místa) nebo nad shromážděním osob na volném prostranství ve výšce nižší než 300 m (1 000 ft) nad nejvyšší překážkou v okruhu 600 m od letadla, b) kdekoli jinde, než je uvedeno v bodu a), ve výšce nižší než 150 m (500 ft) nad zemí nebo vodou.

S výjimkou, kdy je v letovém povolení uvedeno jinak nebo stanoví jinak příslušný úřad ATS, musí být lety VFR v cestovních hladinách nad 900 m (3000 ft) nad zemí nebo vodou nebo nad vyšší hodnotou stanovenou příslušným úřadem ATS prováděny v cestovní hladině, která odpovídá letěné trati, tak jak je stanoveno v tabulce cestovních hladin 7.1.

Lety VFR letadel, která nejsou vybavena pro lety IFR, nebo jsou vybavena pro lety IFR, ale pilot nemá kvalifikaci pro lety IFR, musí být prováděny za stálé viditelnosti země. Let nad oblačností může být proveden, není-li celkové pokrytí oblohy oblačností pod letadlem větší než 4/8 a je možné provádět let podle srovnávací navigace [4].

Kapitola 3

Výchozí stav problému

V této kapitole jsou popsány prostředky dostupné k řešení. Kapitola je rozdělena do dvou sekcí. Sekce jsou: hardwarové prostředky (sekce 3.1) a softwarové prostředky (sekce 3.2). Schéma zapojení hardwarových komponent jednoho letounu využité v této práci je vyobrazeno na obrázku č. 3.1. Multifunkční palubní zařízení INTEGRA EFIS & EMS TL zaznamenává telemetrická data z interních senzorů a senzorů letounu. Jelikož toto zařízení nedisponuje dostatečným počtem vstupních portů standardu RS-232, jsou další komponenty připojeny prostřednictvím vstupního USB portu přes rozbočovač TL hub. K němu jsou připojeny palubní GPS, systém pro detekci kolizních situací na základě detekce radiových signálů Zaon XRX a přídavný palubní počítač Gumstix. Na něm běží softwarové jádro multiagentního systému AgentFly.

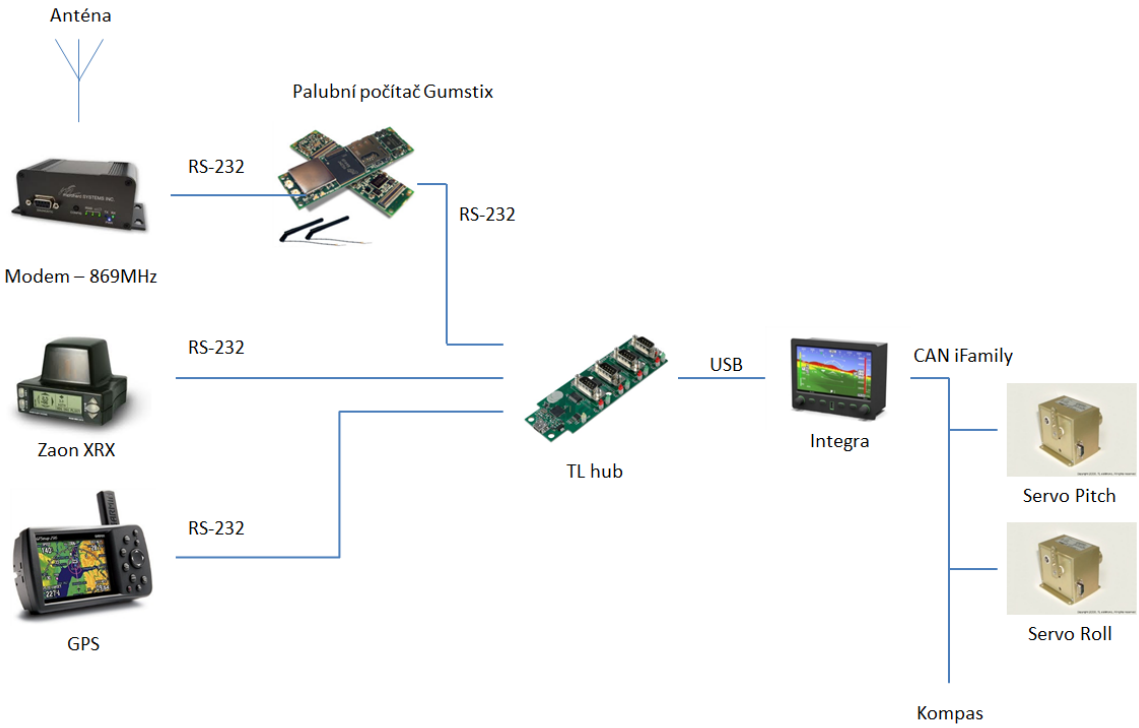
Pro přenos akčních zásahů z modulu autopilota jsou použita dvě serva TL-6550 pro ovládání klopení a náklonu, připojená prostřednictvím sběrnice CAN iFamily. Na této sběrnici je připojen i modul kompasu.

Rádiové pojítko vyobrazené na schématu architektury letounu (obr. 3.1) je připojeno pro účely kooperativního řešení kolizí. Radiový systém pro varování před možnými kolizemi - Zaon XRX umožňuje zjistit polohy okolních letadel v okruhu zhruba 5-9 kilometrů a na základě toho varovat pilota o možných nebezpečích kolizí. Přístroj je zároveň napojen na Integru, která poskytovaná data přeposílá do AgentFly systému k dalšímu zpracování. Na základě těchto dat systém předvídá možný budoucí pohyb okolních letadel a plánuje příslušné změny trajektorií.

3.1 Hardwarové prostředky

3.1.1 Letadla

K dispozici byla dvě ultralehká letadla od výrobce Tecnam. Konkrétně to jsou P92 Echo Super a P2002 Sierra de Luxe. Letadlo Tecnam P92 Echo Super představuje kategorii hornoplošníků. Letadlo Tecnam P2002 Sierra de Luxe představuje kategorii dolnoplošníků.



Obrázek 3.1: Ilustrativní schéma architektury jednoho letounu

P92 Echo Super

Letadlo je zachyceno na obrázku 3.2, jeho technické parametry jsou shrnuty v tabulce 3.1.

P2002 Sierra de Luxe

Letadlo je zachyceno na obrázku 3.3, jeho technické parametry jsou shrnuty v tabulce 3.2.

3.1.2 Přístroj Glass Cockpit

Integrované aviatické systémy typu Glass Cockpit[1] jsou zařízení určená k zobrazování a monitorování průběhu letu a stavu komponent letadla v jednoduché a lehce srozumitelné podobě na jedné obrazovce.

První náznaky revoluce v poskytování informací posádce letounu sahají do 70. let 20. století, kdy CRT obrazovky vyhovující leteckému provozu začaly nahrazovat elektromechanické

[1] Přístroje typu glass cockpit jsou taktéž výrobci a literaturou označované jako "Integrated Cockpit Display Systems" (ICDS), "Electronic Flight Instrument Systems" (EFIS)

Obrázek 3.2: Tecnam P92 Echo Super
Zdroj:[9]

Typ motoru:	Rotax 912 ULS2
Výkon motoru:	100 ks
Počet pilotů:	1 - 2
Maximální vzletová hmotnost:	472,5 kg
Maximální rychlost:	235 km/h
Cestovní rychlost:	215 km/h
Maximální dostup:	4.500 m
Maximální dolet:	1000 km

Tabulka 3.1: Technické parametry letadla P92 Echo Super

zobrazovací přístroje. Tyto nové skleněné přístroje, dávaly kokpitu zřetelně odlišný vzhled a vysloužily si tak označení "glass cockpit".

Běžný dopravní letoun v polovině 70 let měl více jak 100 přístrojů, ovládacích prvků a primárních letových přístrojů (t.j. výškoměr, akustický variometr, rychloměr, kompas, akcelerometr, chronometr, zatáčkoměr se sklonoměrem, indikátor úhlu náběhu, vnitřní teploty vzduchu, venkovní teploty vzduchu atd.), které již tehdy byly přeplněny ukazately a symboly. Zvyšující se počet prvků pilotní kabiny v těchto letech soutěžily o místo v kabině, pozornost pilota a snižovaly přehlednost pilotní kabiny.

V současné době je na trhu dostupný široký výběr typu zařízení glass cockpit. Výrobě, vývoji a prodeji přístrojů typu glass cockpit se věnuje velké množství firem, například TL elekronic [10], Honeywell, Sagem/Safran, Garmin, Aspen Avionics, Avidyne, Bendix/king, Dynon Avionics, JP Instruments a další.

Obrázek 3.3: Tecnam P2002 Sierra de Luxe
Zdroj:[9]

Typ motoru:	Rotax 912 ULS2
Výkon motoru:	100 ks
Počet pilotů:	1 - 2
Maximální vzletová hmotnost:	472,5 kg
Maximální rychlost:	285 km/h
Cestovní rychlost:	210 km/h
Maximální dostup:	4.500 m
Maximální dolet:	750 km

Tabulka 3.2: Technické parametry letadla P2002 Sierra de Luxe

Letouny, využívané při vývoji systému AgentFly, jsou osazeny zařízením Integra TL-6624 firmy TL elektronic a.s.

Integra TL-6624

EFIS[2] & EMS[3] Integra TL-6624 je multifunkční systém monitorující let a motor. TL-6624 integruje všechny primární letové přístroje (t.j. výškoměr, akustický variometr, rychloměr, kompas, akcelerometr, chronometr, zatáčkoměr se sklonoměrem, indikátor úhlu náběhu, vnitřní teploty vzduchu, venkovní teploty vzduchu atd.). EFIS Integra navíc zahrnuje navigaci

[2]EFIS je zkratkou pro anglické electronic Flight Instrument Systems. EFIS jsou zařízení určená k zobrazování a monitorování průběhu letu a stavu komponent letadla v jednoduché a lehce srozumitelné podobě na jedné obrazovce.

[3] EMS anglická zkratka pro engine monitoring system - systém pro monitorování chodu motoru

(t.j. HSI[4], CDI[5] s napojením na populární Garmin SL-30) a 3-D terén s celosvětovým použitím. Dále integruje všechny primární motorové přístroje (t.j. otáčkoměr, indikátor plnícího tlaku paliva, teploměr výfukových plynů, hlav válců, ukazatel teploty oleje a vody, indikátor množství paliva, tlaku paliva, průtoku paliva, voltmetr, ampérmetr, stopky, indikátor vnitřní teploty vzduchu, venkovní teploty vzduchu atd. EMS Integra navíc obsahuje ovládání vrtule pro "Constant Speed"a ovládání sytiče motoru. EMS Integra je kompatibilní se všemi typy v současnosti vyráběných motorů. Přístroj má zabudovaný tříosý autopilot, displej se skutečným zobrazením analogových přístrojů a umožňuje stahování historie měřených veličin na motoru po vsunutí vyjímatelného disku do konektoru v přední části panelu. [11]

Obrázek 3.4: Integra TL-6624
Zdroj:[10]

3.1.3 Gumstix Overo Earth Storm COM

Pro instalaci do ultralehkých letadel byla vytvořena speciální HW platforma založená na výpočetních modulech Gumstix Overo Earth Strorm COM, které využívají procesor Texas Instrument OMAP3730 s architekturou ARM Cortex-A8, taktovací frekvencí až 1GHz a výkonem až 2 000 Dhrystone MIPS. Tento výpočetní modul disponuje 515 MB RAM a externí paměťovou jednotkou SD Card. Na rozdíl od jiných verzí výpočetní jednotky Gumstix byla zvolená taková platforma, která neobsahuje žádné bezdrátové komunikační prostředky (Bluetooth, WiFi), aby bylo zaručeno, že tato jednotka nebude žádným způsobem ovlivňovat ostatní palubní zařízení. Jednotka Gumstix byla zvolena především pro své malé rozměry (17mm x 58mm) a vysokou stabilitu operačního systému založenou na Linux distribuci pro embeded systémy Angstöm (Open Embedded).

[4]HSI je zkratka anglického horizontal situation indicator. Česky indikátor horizontální situace. HSI zobrazuje polohu letadla vůči zvolenému kurzu k majáku, vzdálenost k majáku a polohu letadla vůči sestupové ose.

[5]CDI je zkratka anglického course deviation indicator. Česky indikátor traťové odchylky

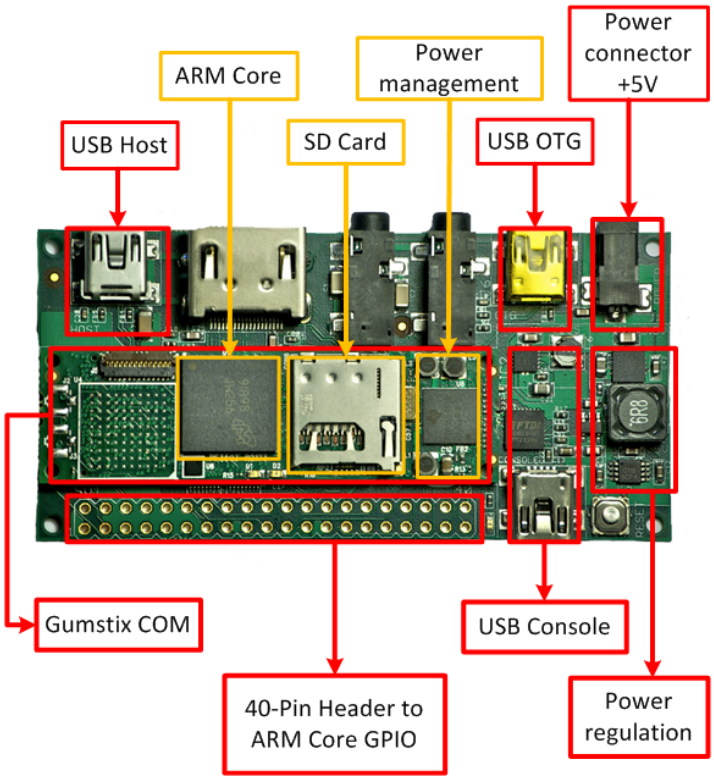
Distribuce byla doplněna o interpret jazyku Java a Java OpenJDK.

Obrázek 3.5: Vypočení jednotka Gumstix Overo Fire

Dalším prvkem přídavné palubní výpočetní jednotky Gumstix je rozšiřující deska Gumstix Summit. Tato deska slouží především jako redukce dvou 70-pin AVX mikrokonektorů, kterými standardně disponuje deska výpočetního jádra. Kromě toho zajišťuje deska Summit také stabilizaci vstupního napájení a prostor pro umístění záložní baterie hodin reálného času.

Dále poskytuje deska Summit značné množství komunikačních kanálů především dva miniUSB konektory, z nichž jeden je v konfiguraci USB host pro připojování vnějších zařízení v roli device a druhý v konfiguraci USB OTG (On The Go), kterou je možné vyžívat, jak v roli device, tak v roli host. Toto rozhraní je specifické tím, že je možné přes něj realizovat jednoduchou sběrnicovou síť dvou zařízení. Dalším využívaným rozhraním desky Summit je systémová konzole vyvedená přes standardní rozhraní FTDI jako miniUSB device. Toto rozhraní umožňuje v případě potřeby servisního zásahu okamžitý přístup přímo do systému pomocí USB kabelu a servisního počítače. Konečně je nejpodstatnějším prvkem desky Summit 40-pin header, který umožňuje přímý přístup na definovaná rozhraní procesoru ARM. Především je to přístup k celé škále tzv. GPIO (vstupně/výstupní rozhraní pro obecné použití) kontaktů, které je možné na základě nastavení MUX registrů procesoru ARM přesměrovat na definovanou podmnožinu zařízení, která procesor ARM poskytuje. V našem konkrétním případě je to především možnost připojit se tímto způsobem k dvěma sériovým linkám typu UART, které následně slouží jako komunikační rozhraní s ostatními prvky palubní zástavby

V rámci projektu bylo definováno propojovací rozhraní mezi výpočetní jednotkou Gumstix a multifunkčním palubním zařízením Integra jako standardní sériová linka typu RS-232 na stanovených napěťových úrovních. Dále bylo stanoveno napájecí napětí palubního rozvodu v intervalu 10,7V – 14,3V. Z tohoto důvodu byla navržena deska CommBoard, která zajišťuje stabilizaci napětí na 5V (napájecí napětí modulu Gumstix) pomocí spínaného regulátoru napětí. Dále je tato deska zodpovědná za převod napěťových logických úrovní procesoru ARM, který využívá k přenosu informací logické úrovně CMOS 1,8V, na logické úrovně standardu RS-232. Tento převod je realizován dvojúrovňově převodem na napěťovou úroveň TTL 5V a následně převodem těchto signálů na úroveň RS-232 pomocí standardního integrovaného obvodu MAX232. Tento převod je na desce realizován pro čtyři kompletní sériové linky a to



Obrázek 3.6: Rozšiřující deska Gumstix Summit

pro rozhraní Gumstix-Integra, Gumstix-Modem (a to včetně HW řízení toku) a konečně pro systémovou konzoli.

Celé řešení přídavné výpočetní palubní jednotky je monolitickým celkem, spojeným mechanickými díly a zapouzdřeným v konstrukčním boxu definovaných vlastností, tak aby byla možná jednoduchá a bezpečná palubní montáž se zachováním maximální přístupnosti všech potřebných vývodů.Na konstrukčním boxu vyvedena dvojice USB A Female konektorů, z nichž jeden slouží pro připojení USB device, což je v našem případě téměř výhradně paměťové zařízení Flash disk pro potřeby automatického přenášení nového firmware a nahrávání uložených logů. Druhý konektor USB pak slouží k připojení na servisní konzoli operačního systému.

3.1.4 Zaon XRX

Zaon XRX je pasivní systém upozorňující během letu na kolizní situace s jinými letouny. Patří do kategorie pasivních systémů, protože na rozdíl například od TCAS není založen na aktivním dotazování transpondérů ostatních letounů. Zaon XRX pouze zachytává vysílání transpondérů ostatních letadel a na základě amplitudy signálu, fázového posunu a vlastnostem integované směrové antény určuje pozici ostatních letounů [1]. Zaon XRX je možné nastavit na tři úrovně rozsahu měření vertikálního a tři úrovně horizontálního směru. Roz-

Obrázek 3.7: Zaon XRX, Zdroj [1]

sahy v horizontálním směru jsou 1.5, 3 a 6 NM[6] Rozsahy výšky jsou 500 ft, 1500 ft a 2500 ft[7]. Vzdálenost detekovaného letounu má vliv na přesnost měření. Tento fakt je vyjádřen tabulkou 3.3 Separátním nastavováním rozsahů pro vertikální a horizontální osu se dosáhne

vzdálenost detekovaného letounu	chyba určení vzdálenosti
0-2.0 NM	0.1 NM
2.0-3.0 NM	0.2 NM
3.0-6.0 NM	1.0 NM

Tabulka 3.3: Vliv vzdálenosti detekovaného letounu na přesnost měření jednotky Zaon XRX

prostorů rozsahu měření vyobrazených na obrázku 3.8.

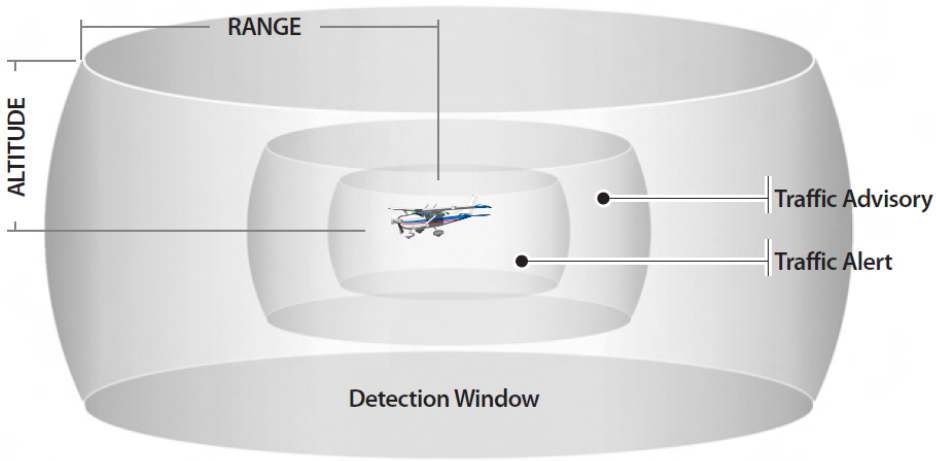
Výška je určována dekódováním zachycené odpovědi transpondéru letadla na dotaz módu C sekundárního radaru, nebo letadla vybaveného systémem TCAS. Nastavení měřícího rozsahu tedy nemá na přesnost určení výšky detekovaného letadla vliv. Výrobce udává konstantní chybu měření ± 200 ft, což ale ve skutečnosti nezáleží jen na přesnosti jednotky Zaon XRX, ale také na přesnosti daných odpovídačů.

Odpovídače na palubě letadla s naistalovaným XRX (v případě tlakované kabiny, kdy se interní výškoměr jednotky XRX nedá použít) a odpovídačem detekovaného letadla.

Relativní výška detekovaného letadla se počítá jako rozdíl vlastní a detekované výšky. Standardní chyba určení ale také závisí na použití, či nepoužití výškoměru integrovaného Zaonem XRX, konkrétně v závislosti na typu kabiny letadla- tlakované či netlakované. V případě tlakované kabiny nelze použít interní výškoměr jednotky XRX. Pokud není použit interní výškoměr jednotky XRX, je relativní výška spočtena jako rozdíl výšek z odpovídače letadla nesoucí jednotku Zaon XRX a letadlem detekovaným. V tomto případě je chyba měření zmíněných ± 200 ft. V případě použití interního výškoměru jednotky Zaon XRX může být chyba měření jiná než udávaná.

Udávaná chyba měření orientace vůči magnetickým pólům Země integrovaného kompasu v jednotce Zaon XRX je ± 20 stupňů.

[6]NM je zkratkou pro nautical mile, v češtině námořní míle.
[7]ft je zkratka pro jednotku délky v angličtině feet, v češtině stopa. Platí 1 m = 3,281 ft



Obrázek 3.8: Vizuální zpracování rozsahů měření jednotky Zaon XRX. Detection Window-rozsah měření, Traffic Advisory a Traffic Alert jsou oblasti úrovně výstrahy pilotovi. Zdroj [1].

Hardwarové limitace

Určení směru detekovaného letadla, je ovlivněna konstrukčním řešením čtyř vnitřních směrových antén. Na displayi jednotky Zaon XRX je azimut detekovaných letadel indikován v přírůstcích o 45 stupních. Zaon XRX byl konstruován s velkým důrazem na cenu pro koncového zákazníka. To se dále projevuje v možnosti sledovat současně maximálně 3 detekovaná letadla. Informace o více letadlech není poskytována ani datovým spojem přes linku RS232. Pozitivem je, že tento systém uchovává stoupající, či klesající tendence detekovaných letadel a informuje o nich uživatele.

Funkci Zaonu XRX ovlivňují blízké feromagnetické předměty. Výrobce udává, že v vzdálenosti 6 palců (přibližně 15cm) od středu zařízení se nesmí nacházet feromagnetický předmět.

Přesnost určení relativního úhlu vůči detekovaným letadlům je dále ovlivněna kombinací dvou faktorů, samotným otočení letounu vůči detekovanému letadlu a konstrukcí letadla osazeného zařízením Zaon XRX. Dochází k zhoršení přesnosti ve směrech, kde v přímé viditelnosti překáží železná, nebo jiná část letadla schopná rušení přijímané odpovědi transpondéru (typicky ocasní část letadla). Situaci vystihují obrázky 3.10, 3.11, 3.12 a 3.13.

Módy jednotky Zaon XRX

Z hlediska poskytování informací se Zaon XRX může nastavit do dvou vzájemně výlučných módů. Informace o provozu není možné zároveň přenášet sériovou linkou a zobrazovat na display jednotky XRX. Mezi těmito módy se přepíná buď manuálním zásahem posádkou letadla, nebo je možné jednotku přepínat pomocí příkazů zaslaných přes sériovou linku.

Obrázek 3.9: Instalovaná jednotka Zaon XRX v kokpitu letadla používaného k testům

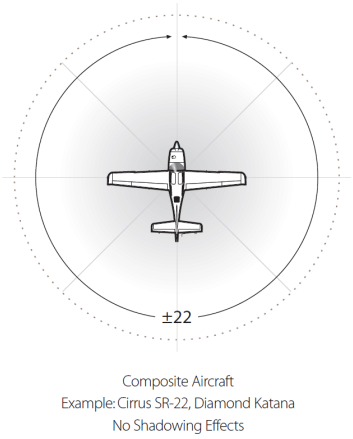
- **Předávání informací o detekovaných letadlech displejem zařízení** Uživatel má na výběr ze dvou způsobu zobrazování dat na display jednotky XRX. Výrobcem označeny jako Screen A a Screen B. V obou případech jsou dostupné informace o primárním detekovaným letadlu a informací o nastavení hlasitosti. Možnost Screen A zobrazuje plné informace i o dalších dvou detekovaných letadlech. To jest relativní horizontální vzdálenost, relativní vertikální vzdálenost a výškových tendencí. Screen B je přehledový pohled z ptačí perspektivy v němž je zobrazeno letadlo s jednotkou, maximálně tři detekovaná letadla a informace o nastavení horizontálního měřícího rozsahu. Popsané zobrazovací módy jsou vyobrazeny na obrázku 3.14.
- **Předávání informací o detekovaných letadlech pomocí sériové linky** má hned několik možných nastavení: Profile 1, Profile 2, Garmin. Volba Garmin je pro nastavení jednotky pro komunikaci se zařízením firmy Garmin, Profile 1 nastaví jednotku pro komunikaci s obdobnými zařízeními jiných výrobců a Profile 2 je jediný zdokumentovaný mód, u kterého je plně veřejně zdokumentován přenosový protokol. Profile 2 kvůli své kompletní dokumentaci byl naší volbou pro komunikaci s jednotkou XRX přes sériovou linku.

Přenosový protokol

Datový tok směrem z jednotky Zaon XRX se započne přepnutím jednotky do Profile 2. Pro kódování dat se používá XOR operace s předem známým klíčem s výjimkami pro nulový bit a bit s hodnotou rovnou klíči. Příchozí packety ze Zaonu mají konstantní délku o 22 bytech. Význam jednotlivých bytů zachycuje tabulka 3.4.

3.1.5 Rádiová pojítka

Rádiová pojítka slouží pro přenos dat mezi více letouny ve vzduchu a mezi letouny a pozemní nepohyblivou stanicí. Protože cílem této práce je nalezení nekooperativního řešení kolizních situací, rádiová pojítka nebyla využita.



Obrázek 3.10: Diagram přesnosti určení azimutu v závislosti na skutečném azimutu a konstrukci letadla. Zdroj[1]

Microhard n920F-ENC

Rádiové pojítko je zachyceno na obrázku 3.15

Technické parametry:

Pracovní frekvence: 869.4 MHz - 869.65 MHz

Technologie rádiového přenosu:: DTS

Výstupní výkon: 100mW - 1W (20-30dBm)

Radiová přenosová rychlost: až 230kbps

Anténní konektor: MMCX

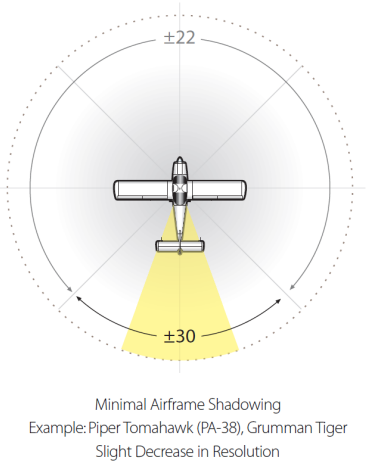
Módy síťování: Point to Point, Point to Multipoint

Komunikační rozhraní: RS-232 vpředu (diagnostic port) RS-232 vzadu (slouží pro data v Data Mode pojítka nebo pro konfiguraci pojítka v Command Mode pojítka) RS-422/RS-485 (pro data)

Napájecí napětí: 9-30 VDC

3.1.6 FLARM

Jednotka je výstražný protisrážkový systém, který ale vyžaduje aby všichni účastníci provozu byly vybaveni jednotkou PowerFLARM. PowerFLARM získává informaci o svojí pozici a pohybu z interního GPS přijímače. PowerFLARM vypočítává předpokládanou trajektorii letu a tuto informaci vysílá společně s unikátním identifikátorem. Současně zařízení přijímá takovéto signály z jednotek PowerFLARM instalovaných v ostatních letounech, rovněž je zařízení schopno přijímat signály ADS-B (1090ES) a odpovědi módů C a S transpondérů.



Obrázek 3.11: Diagram přesnosti určení azimutu v závislosti na skutečném azimutu a konstrukci letadla.(žlutá výseč naznačuje oblast poklesu přesnosti) Zdroj[1]

Tento systém detekuje pouze letadla taktéž vybaven jednotkou PowerFLARM. Pro systém AgentFly jsou vyvíjeny moduly které plní obdobnou funkci k jednotce PowerFLARM. Systém AgentFly je navíc schopen, mimo jiné, nekooperativního řešení kolizních situací. Zařízení PowerFlarm, které nebylo v této práci využito je vyobrazeno na obrázku 3.16.

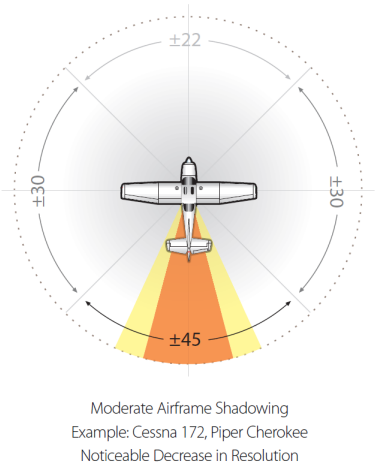
3.2 Softwarové prostředky

V této sekci jsou popsány softwarové prostředky, které byly použity při řešení cílů této práce. Nejvýznamějším je systém Agentfly, který je popsán v sekci 3.2.1. Použitá knihovna řízení komunikace po sériovém portu je popsána v sekci 3.2.2. Z důvodů nedostatků knihovny RXTX bylo potřeba náhradního řešení. Tato jsou popsána v sekcích 3.2.3, 3.2.4 a 3.2.5. Testování implementace přenosových protokolů bylo provedeno za pomoci software popsaného v sekcích 3.2.6 a 3.2.7.

3.2.1 Projekt AgentFly

AgentFly je komplexní multi-agentní systém pro simulaci a řízení letového provozu. Původně byl vyvinut pro účely testování přístupu inteligentních agentů integrujících algoritmy z oboru umělé inteligence a autonomních agentů pro potřeby decentralizovaného systému řízení letového provozu. Systém v rané verzi poskytoval pouze zabezpečení letu pro bezpilotní letecké systémy - tedy ověřoval použití různých metod pro automatizovanou detekci letounů a následné změny letové trajektorie tak, aby udržoval minimální předepsané rozestupy mezi účastníky leteckého provozu.

V současné době umožňuje systém AgentFly simulovat a řídit bezpilotní letové prostředky. Umí plánovat letové trajektorie splňující zadaná omezení vyplývající z letového prostoru a také z dynamiky letounu. Dále je schopen detekovat potenciální kolizní situace



Obrázek 3.12: Diagram přesnosti určení azimutu v závislosti na skutečném azimutu a konstrukci letadla.(žlutá výseč naznačuje oblast poklesu přesnosti, oranžová s rizikem nedetekování). Zdroj[1]

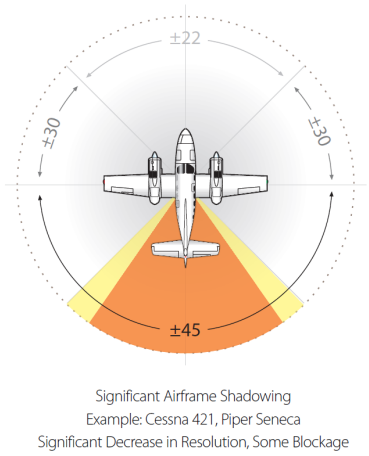
mezi letadly a provést zásahy zpět do řízení letu tak, aby byly dodrženy potřebné rozestupy mezi účastníky leteckého provozu. V oblasti civilního letového provozu je systém AgentFly integrován s modely civilních letadel, pracuje v celosvětovém souřadnicovém systému a je škálovatelný na vysoký počet letadel.

Systém je postaven nad multi-agentní platformou A-globe ve kterém každé simulované letadlo tvoří dva agenti:

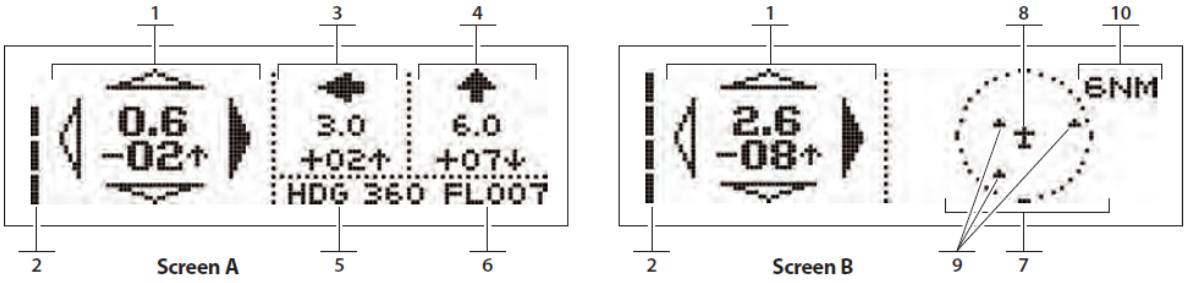
- **Pilot agent** je hlavní řídící jednotkou simulovaného letadla. Odpovídá za tvorbu a modifikaci letových plánů. Obsahuje hlavní část umělé inteligence systému AgentFly. Při prostorovém plánování využívá informace o zakázaných (bezletových) zónách, které si udržuje ve své paměti. Tyto zóny mohou být statické, zadané předem (např. obalové oblasti horského terénu, oblasti okolo jaderných elektráren a vojenských objektů) nebo dynamické (obalové zóny nekooperativních letadel). O řešení kolizních situací se stará dekonflikční modul. Jedná se o komplexní systém pro detekci kolizí, výběr, spouštění a přepínání různých metod jejich řešení (kooperativních i nekooperativních).

- **Plane agent** zprostředkovává Pilot agentovi rozhraní pro ovládání letadla na vyšší úrovni. Pracuje s aktuálním letovým plánem tvořeným množinou význačných bodů, jimiž musí letadlo proletět (tzv. waypointy). Přitom respektuje důležité fyzikální parametry letadla, jako jsou minimální a maximální rychlost a zrychlení, úhly stoupání a klesání, poloměry zatáčení apod. Zprostředkovává také informace o poloze objektů detekovaných palubním radarem a synchronizační časové značky. Na základě příkazů od Pilot agenta provádí nově navržené letové plány.

Zprávy od Pilot agenta směrem k Plane agentu odpovídají požadavkům na změnu letového plánu a naopak zprávy směřující od Plane agenta k Pilotu odpovídají informacím o aktuální pozici a situaci v okolí letadla. Schéma simulovaného letadla je na obrázku 3.17.



Obrázek 3.13: Diagram přesnosti určení azimutu v závislosti na skutečném azimutu a konstrukci letadla.(žlutá výseč naznačuje oblast poklesu přesnosti, oranžová s rizikem nedetekování). Zdroj[1]



Obrázek 3.14: Zobrazovací módy Screen A a Screen B jednotky Zaon XRX

Při nasazení na reálný hardware budou Pilot a Plane agenti spuštěni na palubním počítači a simulační část systému bude nahrazena hardwarovým vybavením letadla.

3.2.2 Knihovna RXTX

RXTX je nativní knihovna pro jazyk java, poskytující řízení paralelní a sériové linky v prostředí Java development toolkit. Knihovna je vydána pod licencí LGPL a je doporučeným řešením komunikace po sériovém portu společností Oracle. Oracle vývoj této knihovny přenechal komunitě. V současnosti již tato knihovna není vyvíjena ani dostatečně podporována komunitou.

Použitím v úvodní fázi implementace spojení mezi Integrou a systémem AgentFly byly odhaleny nedostatky této knihovny. Opakovaně docházelo k špatnému vyhodnocení, nebo nevyhodnocení příznakových bytů. Použití funkcí této knihovny dále způsobovalo zamrznutí systému uvíznutím v některém vnitřním vláknu knihovny a nestabilitu modulu komunikace

Obrázek 3.15: Radiové pojítko Microhard n920F-ENC

Obrázek 3.16: Zařízení Powerflarm

Integra-AgentFly.

Po srovnání zkušeností s použitím knihovny RXTX s zkušenostmi uživatelů v diskuzích a jednoznačným identifikováním knihovny RXTX jako hlavní příčiny problémů, byla knihovna RXTX z projektu odebrána.

3.2.3 Progam Piracom

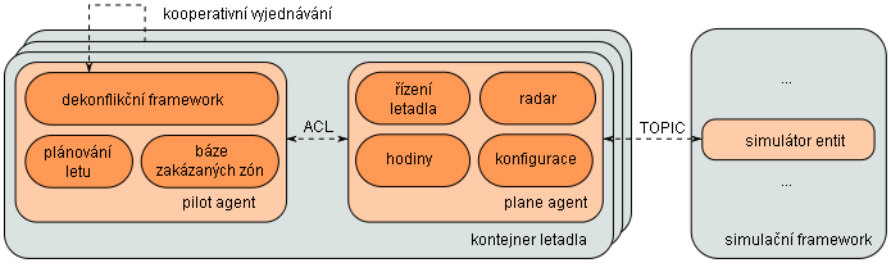
Piracom je jenoduchá freeware aplikace které umožňuje ovládání libovolného RS232 zařízení přes TCP/IP protokol. V angličtině, se tento druh software nazývá serial port redirector. Pro jednu iteraci vývoje byl Piracom úspěšně použit. Nevýhodou tohoto programu je pouze nevýhodný způsob konfigurace. Nastavení sériového portu lze dosáhnout pouze za pomoci uživatelského grafického rozhraní. Tento přístup není pro budoucí použití vhodný a program byl vyměněn za program se shodnou funkcí ale s možností konfigurace z příkazové řádky.

3.2.4 Program SerialToIp

SerialToIP je jednodhuchý terminálový server poskytující projení rozharní serial na TCP/IP tak TCP/IP na serial. Implementován v C#. Program SerialToIp je konfigurovatelný příkazovou řádkou, nebo pomocí vstupních parametrů při spuštění. Dostupný na http://sourceforge.net/projects/

3.2.5 Program ser2sock

Systém Agenfly byl byl v průběhu implementace nasazen na více platforem. Jmenovitě to byl Windows 7 a Linux. Linux byl nasazen na jednotce Gumstix, Windows na noteboocích



Obrázek 3.17: Schéma simulovaného letadla v systému AgentFly

používaných při testovacích letech. Z důvodu neexistence programu SerialToIp pro Linux bylo potřeba najít vhodnou alternativu. Touto alternativou se stal právě program ser2sock. Ser2sock je program typu serial com redirektor pro prostředí Linux a plní v projektu stejnou funkci jako jeho protějšek pro prostředí Windows.

3.2.6 Testovací prostředí sériové komunikace

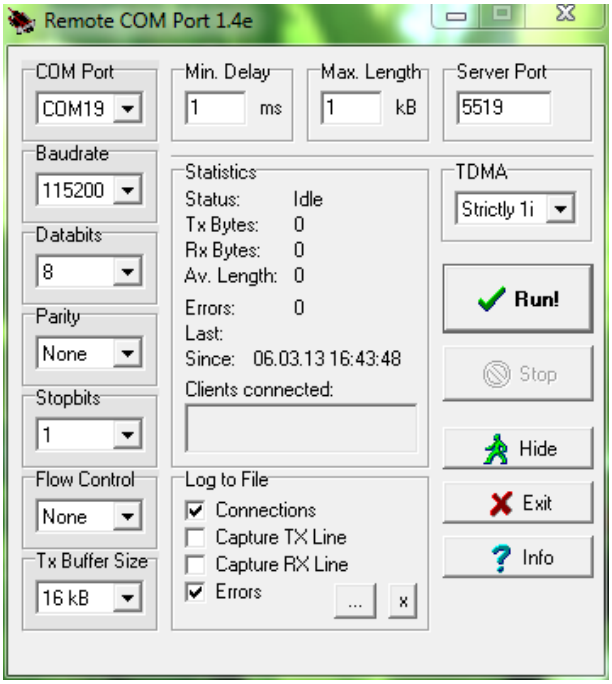
Pro implementaci a testování spojení Integra-AgentFly a Zaon-AgentFly v počátcích vývoje bylo potřeba propojení dvou sériových portů. Potřebu fyzického kabelu k propojení dvou sériových portů a absenci druhého portu na PC vyřešilo použití programu Com0Com (obrázek 3.19).Program Com0Com je „null modem“ opensource virtuální emulátor seriových portů pro Windows vydán pod GPL licencí dostupný na http://com0com.sourceforge.net/.

Null-modem emulator umožňuje vytvoření neomezeného množství virtuálních párů COM portů a použít jakýkoliv z párů k propojení aplikací mezi sebou. Každý pár poskytuje dvojici COM portů. Výstup z jednoho portu je vstup druhého a obráceně. Null-modem emulator poskytuje také rozhranní přesměrování. Například COM na TCP, což umožní komunikaci přes sériový port s TCP/IP servery.

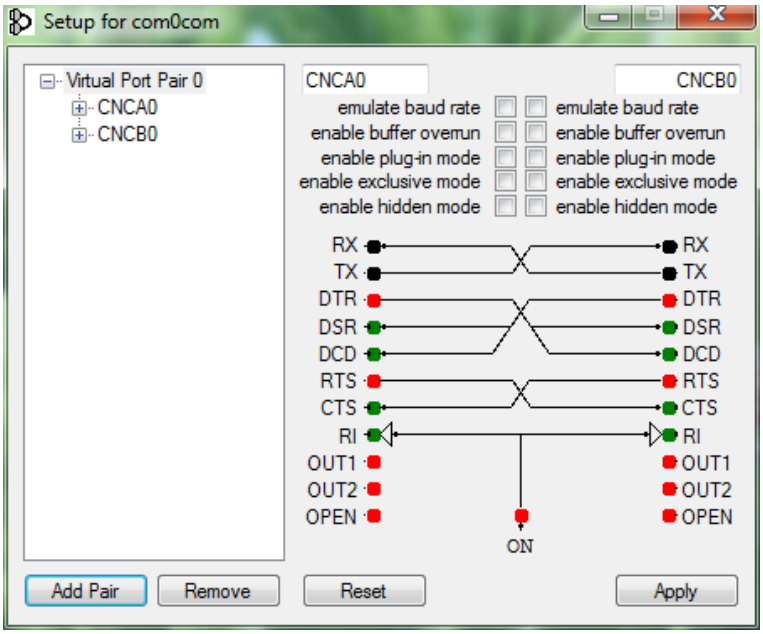
Com0Com byl v počátcích vývoje spojení mezi systémem Integry systémem agentfly hojně využíván. Com0Com v tomto kontextu nahrazoval fyzický kabel „null modem“ na propojení dvojice sériových portů.

3.2.7 Integra komunikační software

V počátcích vývoje nebyla jednotka Integra TL-6624 k dispozici. Firma Tl electronix nám poskytla software, který simuloval činnost jednotky Integra TL-6624 na sériovém portu. Tento software je implementován jako nezávisle spustitelný program pro prostředí MS Windows, který simuluje komunikaci přes sériový port a standardní program Integra Demo PC, spuštěného jako komunikační program na stejném počítači. Tento software byl používán pro ověření funkce implementace protokolu na straně systému Agentfly. Integra komunikační software je vyobrazen na obrázku 3.20.



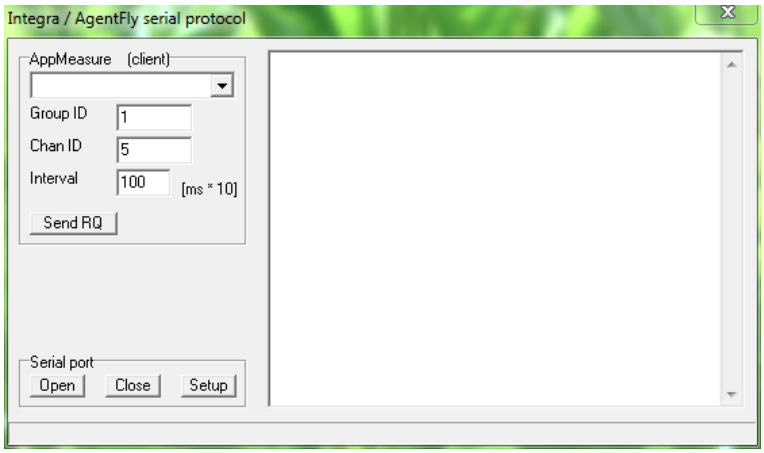
Obrázek 3.18: Prostředí programu Piracom



Obrázek 3.19: Prostředí programu Com0Com

Byte	Description		Output from XRX	Encrypted?
1	Pressure Altitude		Output in hundreds of feet	Yes
2	Priority Aircraft #1	Range	Range x 10	Yes
3		Decoded Altitude	Output in hundreds of feet	Yes
4		Relative Altitude	Output in hundreds of feet	Yes
5		Magnetic Bearing	Bearing Degrees / 10	Yes
6	Priority Aircraft #2	Range	Range x 10	Yes
7		Decoded Altitude	Output in hundreds of feet	Yes
8		Relative Altitude	Output in hundreds of feet	Yes
9		Magnetic Bearing	Bearing Degrees / 10	Yes
10	Priority Aircraft #3	Range	Range x 10	Yes
11		Decoded Altitude	Output in hundreds of feet	Yes
12		Relative Altitude	Output in hundreds of feet	Yes
13		Magnetic Bearing	Bearing Degrees / 10	Yes
14	Flag Register 1	Bit 0	1 = Traffic 1 is above, 0 = Traffic 1 is below	Yes
		Bit 1	1 = Traffic 2 is above, 0 = Traffic 2 is below	
		Bit 2	1 = Traffic 3 is above, 0 = Traffic 3 is below	
		Bit 3-7	Future Use (no significance)	
15	Flag Register 2	Bit 0	1 = Traffic 1 is climbing, 0 = No Change or level	Yes
		Bit 1	1 = Traffic 1 is descending, 0 = No Change or level	
		Bit 2	1 = Traffic 2 is climbing, 0 = No Change or level	
		Bit 3	1 = Traffic 2 is descending, 0 = No Change or level	
		Bit 4	1 = Traffic 3 is climbing, 0 = No Change or level	
		Bit 5	1 = Traffic 3 is descending, 0 = No Change or level	
		Bit 6-7	Future Use (no significance)	
16	Host Transponder Squawk Code	1st Digit (A)		Yes
17		2nd Digit (B)		Yes
18		3rd Digit (C)		Yes
19		4th Digit (D)		Yes
20	Received Byte 1	Data last received from Host for verification of XRX reception		Yes
21	Received Byte 2			Yes
22	Checksum	Sum of Bytes 1 - 21 in 8 bit rollover (i.e. 255 + 1 = 0)		NO

Tabulka 3.4: Význam jednotlivých bytů packetu vysílaných jednotkou XRX



Obrázek 3.20: Prostředí komunikačního software simulující protokol zařízení integra

Obrázek 3.21: Zařízení Integra TL-6624, Zaon XRX a externí jednotka GPS při jednom z testovacích letů

Kapitola 4

Implementace

Hlavní myšlenkou je predikovat kolizní kurzy detekovaných letadel a následně upravit letový plán tak, aby ke kolizi nedošlo. Jak se toho dosahuje v systému Agetfly včetně popis využitých komponent systému je popsáno v sekci 4.1.

Predikce pohybu detekovaných letadel, popsané v sekci 4.4, jsou získány na základě interpolace posledních detekovaných poloh letounů. Informace o posledních pozicích detekovaných letounů jsou zatíženy nepřesností. Měření bylo provedeno na dvou letadlech blíže popsaných v sekci 3.1.1. Letadla jsou pro testy vybavena zařízením glass cockpit typu Integra TL-6624 (viz. 3.1.2), připojeným přijímačem GPS (viz. 2.3.1) a jednotkou Zaon XRX (viz. 3.1.4). Jednotka Zaon XRX zachytává odpovědi transpondéru (sekce 2.3.3) a z nich určuje pozici detekovaného letadla. Pro ověření přesnosti detekce dat poskytovaných jednotkou Zaon XRX byl jako reference použit záznam trasy letadla z detekovaného letadla. Naměřeným polohám a analýze jejich nejistot se podrobněji věnuje sekce 4.3.

Informace o pozicích letounů se získávají z jednotek Integra TL-6624 a Zaon XRX. Implementace přenosových protokolů jednotek Integra TL-6624 a Zaon XRX na straně systému Agentfly jsou popsány sekci 4.2. Fotografie zařízení Integra TL-6624, Zaon XRX a externí jednotky GPS při získávání dat k analýze je na obrázku č. 4.1.

Kolize jsou určovány na základě znalosti vlastního letového plánu, predikce letového plánu detekovaného letounu a velikosti bezpečnostních zón jednotlivých letadel. Popis detekce kolizí a související určení velikosti bezpečnostních zón je v sekci 4.5.

K přeplánování letového plánu se využívá tzv. dynamických bezletových zón. Dynamické bezletové zóny jsou určeny svojí velikostí, tvarem a časem platnosti. Tyto zóny jsou prostorovým a časovým určením oblasti s největší pravděpodobností kolize. Přeplánování, určení dynamických bezletových zón a úhybným manévrům se věnuje sekce 4.6.

Je potřeba připomenout skutečnost, že Agentfly narozdíl od Integry není fyzickým zařízením a ale softwarovým systémem. Agentfly je implementován v jazyce java a běží v prostředí java virtual machine verze 1.7.0. Agentfly tedy potřebuje fyzický hardware vybavený interpretem jazyku Java, na kterém bude spuštěn. Pro tento účel byla vybrána výpočetní jednotka Gumstix Overo Earth Storm COM. Tato jednotka je blíže popsána v sekci 3.1.3.

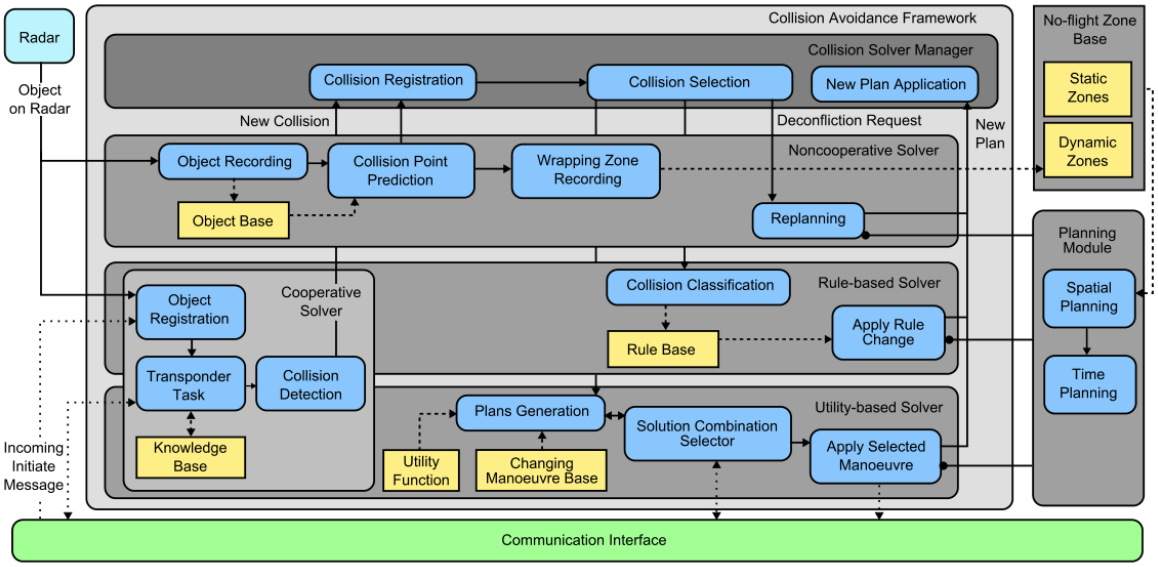
Obrázek 4.1: Zařízení Integra TL-6624, Zaon XRX a externí jednotka GPS při jednom z testovacích letů

4.1 Zasazení implementace do systému Agentfly

Architektura vícevrstvého frameworku pro řešení kolizí systému AgentFly je zobrazena na obrázku číslo 4.2. Collision Solver Manager (CSM) je hlavní částí při řešení kolizních situací každého letadla. CSM provádí výběr Collision Solver (CS), který bude použit při řešení konkrétní kolize. V našem případě je vždy vybírán nekooperativní solver, na schématu popsán jako Noncooperative Solver. Každý CS má dvě hlavní funkce: detekce kolize a úpravu letového plánu tak, aby se kolizi předešlo. Detekovanou kolizi předává collision solver CSM. CSM může získat oznámení o kolizi od více CS s jiným časem kolize. CSM vybere příslušný collision solver s nejkratším časem do kolize a konfigurace. CS pak řeší kolizní situaci v čase, který je mu přidělen CSM. CS posílá po vyřešení kolize nový letový plán CSM, který je pak vykonán. Pokud čas určený CSM pro vyřešení kolize uplyne před vyřešením kolize ukončí CSM činnost CS a vybírá nový CS pro řešení této kolize. Diagram na obrázku č. 4.2 zachycuje kromě nekooperativního CS také Ruled-based CS a Utility-based CS, které nejsou předmětem této práce[2].

Diagram na obrázku č. 4.3 znázorňuje nekooperativní CS. Modul *radar* v naší implementaci zastupuje fyzická jednotka Zaon XRX při letech na reálného letadla a modul simulující činnost jednotky Zaon XRX v případě simulace. Modul *collision point prediction* jsou implementované moduly prediktorů Linear a Taylor popsaných v sekcích 4.4 a 4.5.

Smyčka algoritmu řešení kolizní situace je spouštěn informací získanou z modulu radaru



Obrázek 4.2: Struktura řešení kolizí v systému AgentFly. Zdroj [2]

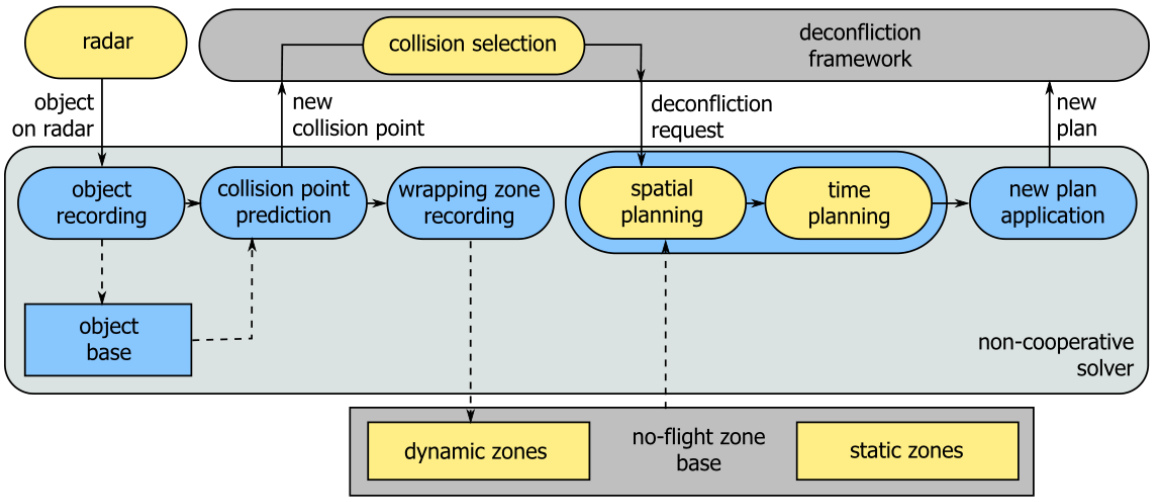
popisující pozici neznámého letounu v letovém prostoru. Tento letoun je zaznamenán do databáze letounů (object base) pokud v ní již není zaznamenán. Je-li detekovaný letoun již znám je jeho pozice aktualizována. Následujícím krokem je predikce kolizního bodu (sekce 4.5). Při nenalezení kolize je běh algoritmu ukončen. V opačném případě je bod obalen dynamickou bezletovou zónou a je předán komponentě Collision solver manageru, který rozhodne zda je potřeba danou kolizi vyřešit.

Pokud Collision solver manager rozhodne, že je kolize má být řešená je posledním krokem přeplánování letového plánu od současné pozice komponentou přeplánování. Tato komponenta je v schématu nekooperativního collison solver modulu (obrázek č. 4.3) označena jako spatial planning a time planning. Popis přeplánování letového plánu je popsán v sekci 4.6.

Po nalezení kolizního bodu je vypočítána a umístěna do prostoru tzv dynamická bezletová zóna (DNFZ - Dynamic No-Flight Zone) obalující bod kolize. Dynamická bezletová zóna je vypočtena za pomoci znalosti polohy kolizního bodu, nepřesnosti určení predikce letového plánu detekovaného letounu a všech dostupných informacích o detekovaném letadle a letadle provádějící detekci. Pro konstrukci DNFZ jsou použity dva přístupy. DNFZ pro kolize v vzdálenější budoucnosti se používá tvar elipsoidu. Rozměry elipsoidu jsou určeny na základě vzdálenosti do kolize, rychlost obou letounů a pravděpodobnosti kolize. DNFZ pro bezprostřední byl použit vějířovitý tvar vyplývající z expanze oktanového stromu[12]. Tvar dynamických bezletových zón je zachycen na obrázku číslo

4.2 Implementace přenosových protokolů

Pro získání poloh detekovaných letounů a ověření přesnosti byly implementovány dva přenosové protokoly 1) přenosový protokol mezi systémem AgentFly a zařízením Integra



Obrázek 4.3: Struktura nekooperativního řešení kolizí v systému AgentFly. Zdroj [2]

TL-6624, 2) přenosový protokol mezi systémem AgentFly a zařízením Zaon XRX. Implementace přenosových protokolů byly realizovány jako samostatně spustitelné moduly systému AgentFly a moduly pro simulaci vně systému AgentFly. Obě implementace samostatně spustitelných modulů jsou přizpůsobeny pro platformy Windows (na počítačích) a Linux (na jednom z testujících laptopů a platformě Gumstix Overo Earth Storm COM). Tyto moduly obstarávají komunikaci mezi Agentfly a jednotkou Integra TL-6624 /jednotkou Zaon XRX a záznam naměřených dat do souborů pro pozdější analýzu.

4.2.1 Rozhraní Integra-Agentfly

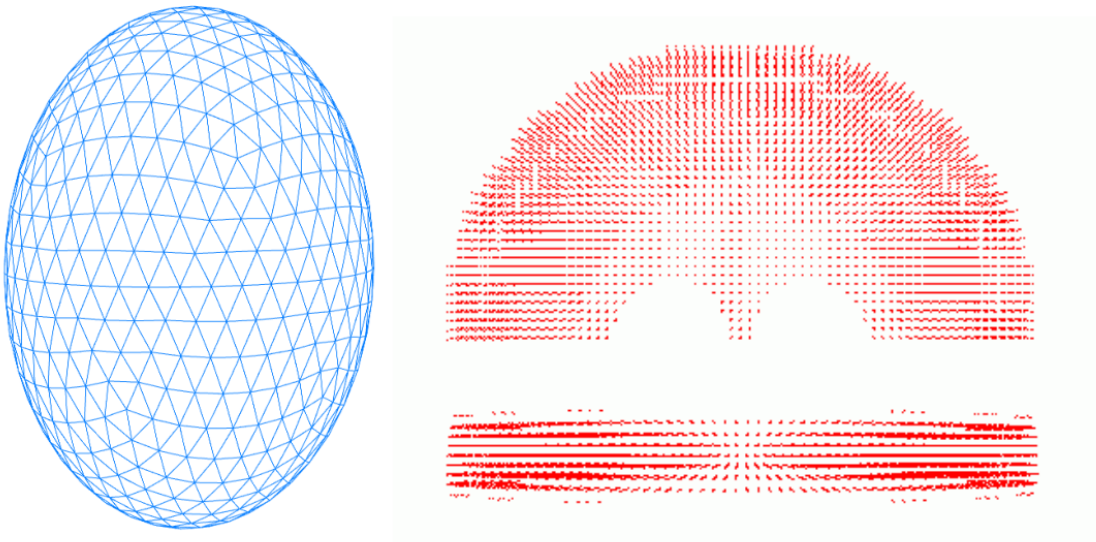
Komunikační rozhraní mezi Integrou a systémem AgentFly je řešeno přes sériový port, pomocí sady proprietárních komunikačních protokolů. Komunikační protokoly jsou řazeny do vrstev a v implementaci protokolů jsou použity právě dvě: transportní vrstva a aplikační vrstva.

Transportní vrstva zajišťuje základní funkci přenosu paketu. Obsahuje informace o typu zasílaného paketu, jeho délce, kontrolní součet pro ověření integrity obsahu pomocí kontrolního součtu CRC-16[1].

Aplikační vrstva zajišťuje buď přenos požadavků na zařízení Integra TL-6624, přenos zprávy o potvrzení příjmu požadavku nebo přenos vyžádaných dat. I tato vrstva je opatřena kontrolním součtem CRC-16 integrity dat.

Data jsou přenášena formou paketů s proměnnou délkou. Jednotlivé pakety jsou označeny na svém počátku startovacím bytem. Paket je rozdělen do dvou částí. Z první části o fixní

[1]CRC je anglická zkratka pro cyclic redundancy check. V češtině cyklický redundantní součet. CRC je označení typu hašovacích funkcí používaných k detekci chyb dat během přenosu či jejich ukládání. CRC-16 označuje 17ti bitový cyklický redundantní součet.



Obrázek 4.4: Dynamické bezletové zóny pro vzdálené kolize (elipsoid) a bezprostřední kolize. Zdroj [2]

délce je získávána informace o délce celého paketu, typu přenášených dat a kontrolním součtu. Druhá část obsahuje podle typu paketu žádost o data, informaci o úspěšném přijetí žádosti, nebo samotná data. Jak již bylo právě naznačeno, zařízení Integra TL-6624 zasílá data na základě přijatých žádostí. Tyto požadavky specifikují časovou periodu a typ dat který bude Integra TL-6624 zasílat. Perioda zasílání dat se přiřazuje skupinám, do kterých je možné přidat až 8 kanálů, kde kanál je soubor dat s specifickým zaměřením. Například kanál č. 7 je vyhrazen pro údaje o GPS souřadnicích, kanál č. 5 je obsahuje informace o orientaci letadla v prostoru atd. Přijetí datových paketů nejsou přijímací stranou pakety nijak potvrzovány.

Z povahy požadovaných dat bylo zřejmé, že dotazy se budou opakovat pro více případů. Pro snadné znovupoužití a snadnou modifikaci požadavků byly požadavky zaznamenány do externích konfiguračních XML souborů.

Nelze vyloučit ztrátu dotazu, nebo porušení jeho integrity. Integra tedy zasílá potvrzení o přijetí jednotlivých neporušených dotazů. Ze zásobníku dotazů byl dotaz odebrán teprve tehdy, až druhá strana potvrdila jeho přijetí zasláním korespondujícím potvrzení o přijetí.

Bylo implementováno kontrolní vlákno přijetí dotazu. Dotazy po načtení z externích XML souborů jsou ukládány do zásobníku. Z vrchu zásobníku se po uplynutí časového limitu posílá dotaz. Při přijetí potvrzení o přijetí dotazu druhou stranou zahazuje dotazy z vrchu zásobníku a posílá okamžitě další. Tímto se dosahuje proměnné rychlosti posílání dotazů, které vede na ušetření výpočetního výkonu.

Transportní protokol

Transportní protokol se skládá z sedmi částí:

Uvozovací Byte neboli Start Byte - označuje začátek packetu

Příznakové bity - služební příznaky protokolu (pro budoucí využití)

Identifikátor protokolu - identifikátor Aplikačního protokolu

Délka dat - velikost aplikačních dat

HeadCRC - cyklický redundantní součet hlavičky k rozpoznání chyby hlavy paketu

Data - Byty aplikačního protokolu o délce stanovené v hlavičce transportního protokolu

PacketCRC - cyklický redundantní součet k rozpoznání chyby přenosu paketu

Start byte má v současnosti hodnotu 0x11

Identifikátor protokolu je v současnosti pouze jeden. Je to 0x0001 a označuje Aplikační protokol Measure.

Aplikační protokol Measure

Aplikační protokol je zapouzdřen do transportního protokolu jako data transportního protokolu. Protokol má následující formát:

Hlavička:

Typ příkazu zde vždy 0x01 - typ příkazu odpověď

Identifikátor příkazu 0 - nic, 1 - aktivace a nastavení parametru skupiny, 2 - deaktivace skupiny, 3 - registrace kanálu skupiny, 4 - příchozí data skupiny (broadcast - bez odpovědi)

Jednotlivé identifikátory příkazu mají za hlavičkou protokolu parametry příkazu v následujících formátech:

Aktivace a nastavení parametru skupiny:

Identifikátor skupiny - číslo skupiny (0-7)

Refresh interval - obnovovací perioda (10-65535) [ms]

Deaktivace skupiny:

Identifikátor skupiny - číslo skupiny (0-7)

Příznaky - nultý bit Bytu 1 = vyprázdnit skupiny, 0 = ponechat

Registrace kanálu skupiny:

Identifikátor skupiny - číslo skupiny (0-7)

Identifikátor kanálu - číselný identifikátor kanálu pro vložení do skupiny

Příchozí data skupiny:

Identifikátor skupiny - číslo skupiny (0-7)

počet kanálů - počet kanálů, resp dvojic údajů, které budou následovat

Datové dvojice:

Identifikátor kanálu - číselný identifikátor kanálu

hodnota - naměřená hodnota pro daný kanál Integrou

V současné době existují následující omezení:

1. Maximální počet skupin – 8 (0-7)
2. Maximální počet měřících kanálů ve skupině 16
3. Obnovovací frekvence skupin 100ms – cca 10 minut

4.2.2 Rozhraní Zaon-Agentfly

Komunikace mezi zařízením Zaon XRX a výpočetní jednotkou Gumstix Overo Earth Storm COM je rovněž realizována po sériové lince. Detailní popis struktury protokolu jednotky Zaon XRX je popsán v sekci 3.1.4.

Data přijímaná z jednotky Zaon XRX jsou posílány ve formě paketů s konstantní délkou 22 bytů. Začátek, nebo konec paketu nejsou označeny.

Pakety zasílané jednotkou Zaon XRX, na rozdíl od paketů zasílaných Integrou, nenesou startovní byty, které by usnadnily rozpoznání začátků/konců jednotlivých paketů ve frontě zásobníku sériové linky. Využívá se faktu, že mezi příchody jednotlivých paketů jsou časové prodlevy. Prodlevy mezi příchody jednotlivých paketů jsou v řádu sekund. To je dostatečná doba na vyčtení celého zásobníku sériové linky. Nahromadění paketů ve frontě a poškození jednoho, nebo více paketů ve frontě způsobí nečitelnost celého zásobníku. Zvolené řešením tohoto problému je vyprázdnění celého zásobníku a čekání na nová data.

Po ohlášení přijetí dat sériovou linkou, je vyčteno ze zásobníku sériového portu konstantních 22 bytů. Podle kontrolního součtu je identifikována integrita přijatých dat. Pokud je detekována chyba na přenosové cestě, vyprazdňuje se zásobník přijatých dat sériového portu. Tímto způsobem se zabrání propagaci chyby při výpadku přenosu dat.

Všechny byty přenesených dat jsou kódovány exkluzivní disjunkcí s předem známým klíčem a výjimkami pro kódování zadané výrobcem. Prvním krokem při získávání informací z přijatého paketu je dekódování zakódované části paketu. Po dekódování paketu se data ukládají přímým přiřazením hodnot s výjimkou výškových příznakových bytů, které byly pro jednotlivá letadla vymaskována.

Jednotka Zaon XRX je schopná zobrazovat relativní azimut detekovaných letadel. Data zasílaná po sériové lince je nicméně postrádají potřebné informace k určení relativního azimutu, viz tabulka významu jednotlivých bitů paketu vysílaných jednotkou XRX 3.4. Chybějící informací k určení relativního azimutu je absolutní azimut letadla nesoucí jednotku Zaon XRX. Informace o abs. azimutu se získává z jednotky Integra TL-6624. Relativní azimut je počítán jednoduchým algoritmem.

Algorithm 1 Výpočet relativního azimutu

```
1: procedure RETRELBEARING(magBearing, magHeading)
2:     retVal = magBearing − magHeading
3:     if retVal < 0 then
4:         return retVal − 360                ▷ ošetření vrácení neplatné hodnoty
5:     end if
6:     return retVal
7: end procedure
```

4.3 Analýza dat

Výrobcem Udávané nepřesnosti jsou popsány v sekci 3.1.4. Výška detekovaného letadla je odečítána z odpovědi transpondéru. Chyba určení výšky detekovaného letounu je proto konstantní pro všechny vzdálenosti. Výrobce udává ±200 stop (60.960 m). Vzdálenost letadla je určována na základě amplitudy přijatého signálu odpovídače detekovaného letadla. Výrobce udává tři tolerance. Po celou dobu testování se testovaná letadla držela v intervalu 0 až 2 NM (0 až 3704 m) pro který výrobce udává chybu 0.1 NM (0.185 m). Udávaná chyba určení azimutu podle výrobce se pohybuje od ±22° do ±45° v závislosti na vzájemné orientaci letounů a typu trupu letadla nesoucí jednotku Zaon XRX (viz sekce 3.1.4).

Chyba určení polohy je posuzována na základě střední hodnoty naměřených dat, respektive jejich váženého průměru a rozptylu naměřeného souboru dat. Střední hodnota je vyjádřena vztahem

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \tag{4.1}$$

kde $\overline{x}$ je střední hodnota, x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty a n je počet měřených hodnot.

Vážený průměr je vyjádřen jako

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \tag{4.2}$$

kde $\overline{x}$ je vážený průměr, x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty w_i je počet výskytu jednotlivých hodnot a n je celkový počet měřených hodnot.

Rozptyl je vyjádřen rovnicí

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}, \tag{4.3}$$

kde s je rozptyl (neboli disperze), x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty a n je celkový počet měřených hodnot.

4.3.1 Vzdálenost

Porovnání naměřených dat s referencí je zachyceno v grafu na obrázku č. 4.5. Histogram odchylek detekovaných vzdáleností od reference je zobrazen v grafu č. 4.6.

Vážený průměr spočtený podle rovnice 4.2 pro tuto sadu dat odchylek vzdáleností má hodnotu

$$\overline{x} \approx 888.90[m]. \tag{4.4}$$

Rozptyl detekovaných vzdáleností od reference spočtený podle vztahu 4.3

$$s \approx 793.56[m]. \tag{4.5}$$

4.3.2 Výška

Porovnání naměřených dat s referencí je zachyceno v grafu na obrázku č. 4.7. Určení výšky detekovaného letadla je jediný měřený údaj, který nikdy nepřekročil toleranci udávanou výrobcem jednotky Zaon XRX, tedy $\pm 200ft$.

4.3.3 Azimut

Porovnání naměřených dat s referencí je zachyceno v grafu na obrázku č. 4.8. Histogram odchylek detekovaných azimutů od reference je zobrazen v grafu č. 4.9.

Vážený průměr spočtený podle rovnice 4.2 pro tuto sadu dat odchylek azimutu má hodnotu

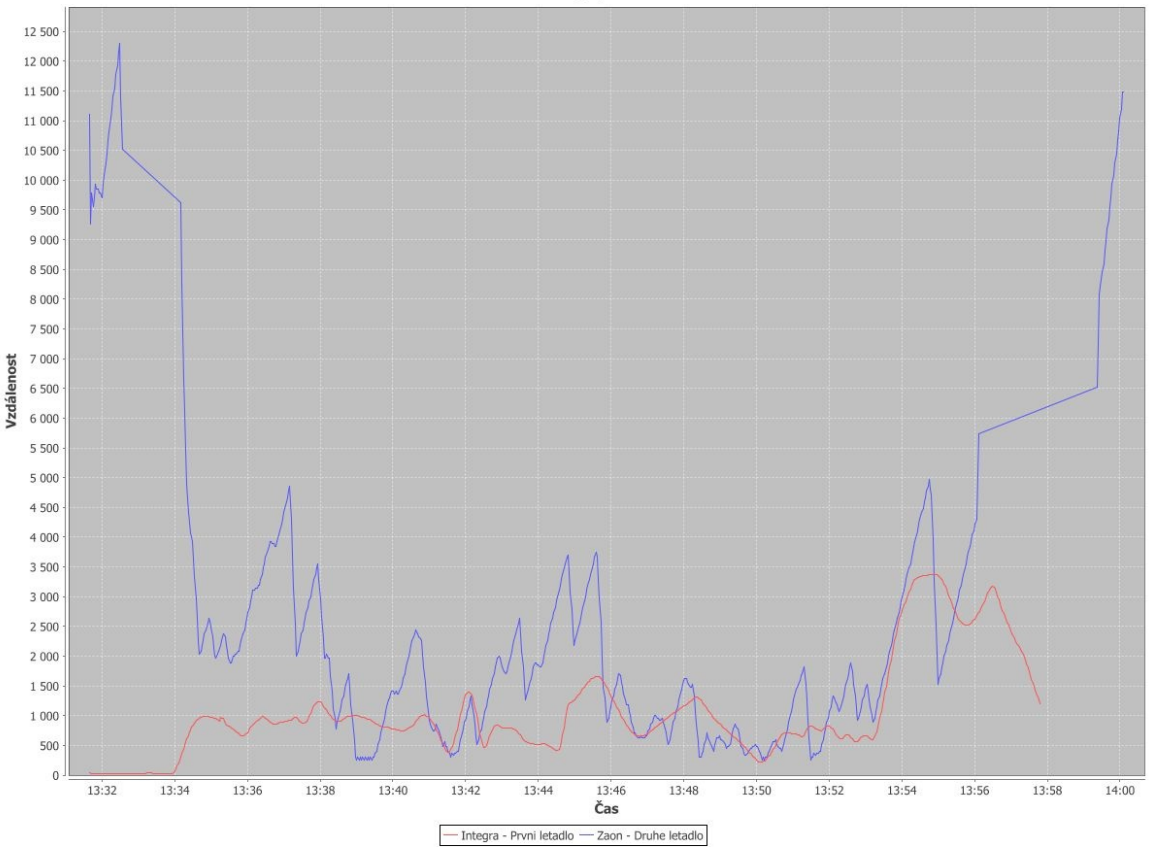
$$\overline{x} \approx 58.69^\circ. \tag{4.6}$$

Rozptyl detekovaných azimutů od reference spočtený podle vztahu 4.3

$$s \approx 70.58^\circ. \tag{4.7}$$

4.4 Predikce pohybu

Jelikož letový plán detekovaného letadla není znám, je k predikci letového plánu použito dvou predikčních algoritmů: Lineární a Taylorův.



Obrázek 4.5: Porovnání naměřené výšky proti referenci.
(modrá - naměřené data, červená - reference)

4.4.1 Lineární predikce

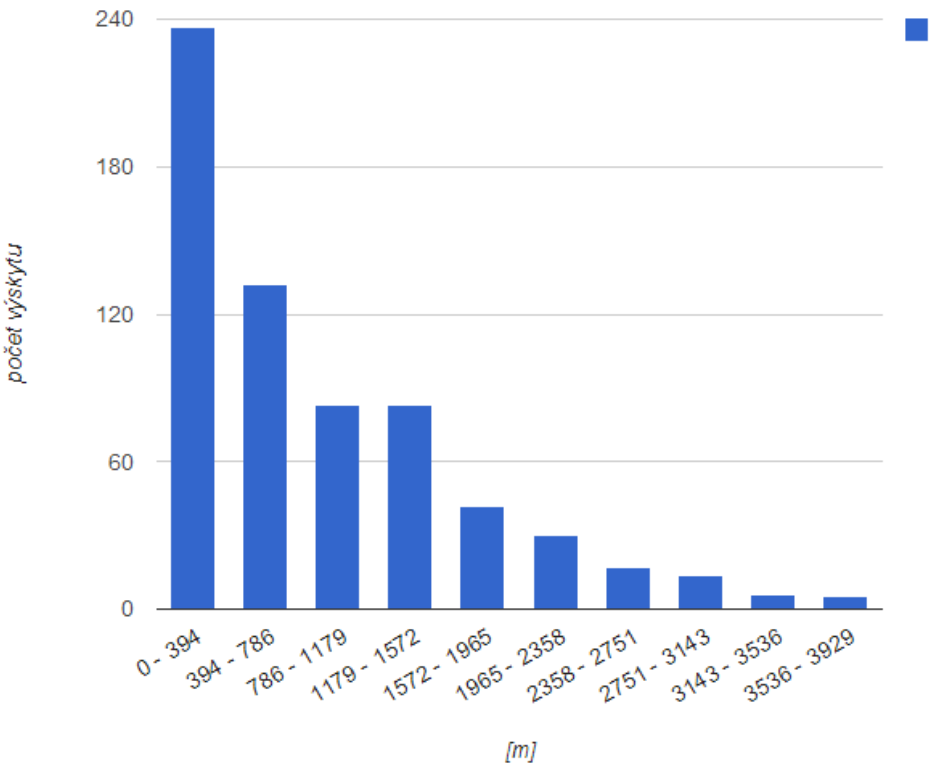
Lineární predikce odhaduje budoucí trajektorii detekovaného letadla z dvou detekovaných pozic nekooperativního letadla. Tyto body jsou poslední detekovaná pozice $\overline{s}$ a předposlední detekovaná pozice nekooperativního letadla $\overline{s_p}$. Vektor predikovaného směru $\overline{d}$ je spočten jako

$$\overline{d} = \overline{s} - \overline{s_p}. \tag{4.8}$$

Rychlost nekooperativního letadla v je spočtena jako

$$v = \frac{\|\overline{d}\|}{t - t_p}, \tag{4.9}$$

kde t je čas poslední detekované pozice a t_p je čas předposlední detekované pozice nekooperativního letadla.



Obrázek 4.6: Histogram absolutních hodnot odchylek detekované vzdálenosti od reference

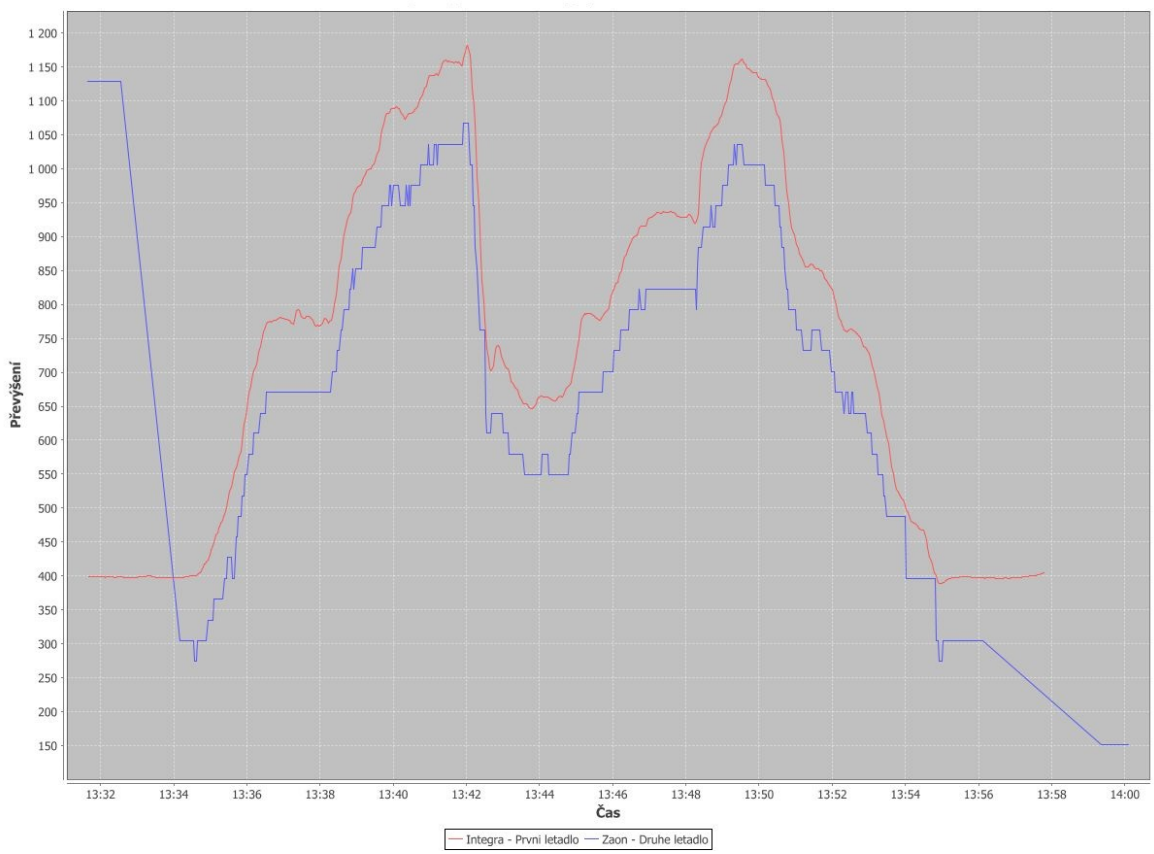
4.4.2 Taylorova predikce

Lineární predikce není vhodná pro predikci letového plánu letadla, který obsahuje časté změny směru. Protože chyba predikce je v takovém případě velmi vysoká, byl do systému AgentFly implementován prediktor využívající taylorovy řady. Celý taylorův prediktor pro trojdimezionální prostor je realizován jako tři na sobě nezávisející rozvoje podle taylorovy řady. Každý ze tří rozvojů popisuje jednu z souřadnic: výšku, zeměpisnou šířku a zeměpisnou délku. Pozice detekovaného letadla je fukcí času. Taylorův polynom pro jednu z souřadnic je

$$\tilde{f}(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{f^{(n)}(t_0)}{n!}(t - t_0)^n, \tag{4.10}$$

kde $\tilde{f}(t)$ je trajektorie detekovaného letounu, $f^{(n)}$ je n-tá derivace trajektorie v čase t_0. Číslo n vyjadřuje řád rozvoje taylorova polynomu. Pokud je $n = \infty$, pak $\tilde{f}(t) = f(t)$. Pro $n < \infty$ je chyba predikce 0 pro čas t_0 a roste s rozdílem časů $t - t_0$.

Implementace taylorova rozvoje v systému Agentfly se provádí pomocí série diskrétních



Obrázek 4.7: Porovnání naměřené výšky proti referenci.
(modrá - naměřené data, červená - reference)

pozic s údajem o času, které jsou získány pomocí jednotky Zaon XRX. Derivace jsou počítány pomocí rozdílů mezi posledními získanými pozicemi. K spočtení n-té derivace je použito n+1 posledních pozic. Hodnoty k-tých iterací jsou:

$$\triangle^{(0)} f(t_k) = f(t_k), \tag{4.11}$$

$$\triangle^{(1)} f(t_k) = \frac{f(t_k) - f(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}, \tag{4.12}$$

$$\triangle^{(2)} f(t_k) = \frac{\triangle^{(1)} f(t_k) - \triangle^{(1)} f(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}, \tag{4.13}$$

$$\vdots$$

$$\triangle^{(n)} f(t_k) = \frac{\triangle^{(n-1)} f(t_k) - \triangle^{(n-1)} f(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}, \tag{4.14}$$

Obrázek 4.8: Porovnání naměřeného azimutu proti referenci.
(modrá - naměřené data, červená - reference)

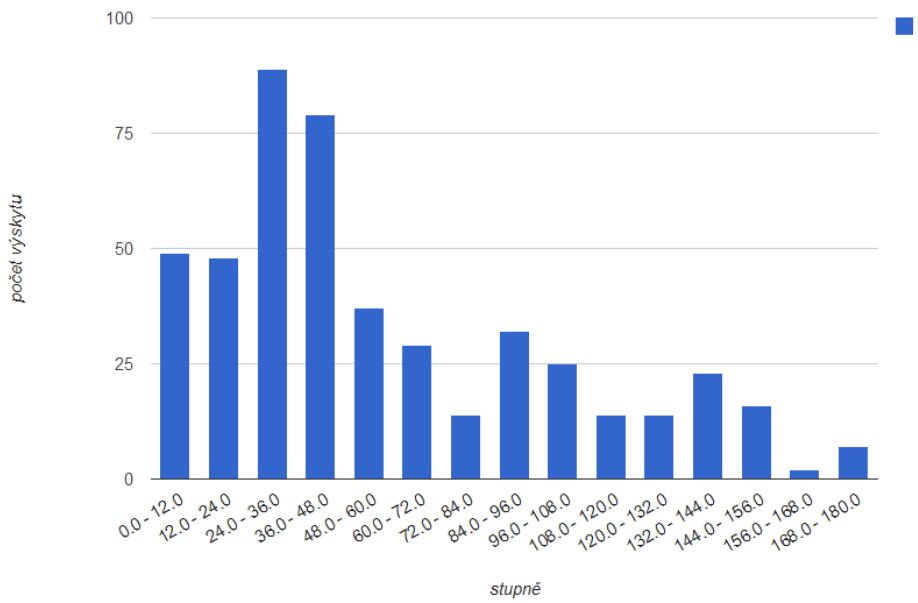
kde $\triangle^{(n)} f(t_k)$ je n-tá diference v čase t_k. Pro řád taylorova prediktoru 1 je predikce totožná s predikcí lineární.

4.5 Detekce kolizí

Cílem detekce kolize je určení bodu kolize. Bod kolize je bod v prostoru a času, kde pravděpodobnost protnutí letového plánu (letounu provádějícího predikci) a predikovaného letového plánu detekovaného letounu překročí stanovenou prahovou úroveň.

Je žádoucí vyhnout se nebezpečnému přiblížení letounů. Tento požadavek je zohledněn tzv. bezpečnostními zónami. Bezpečnostní zóna je předem stanovená oblast v prostoru s letounem ve svém středu. Cílem bezpečnostních zón je stanovit minimální rozestupy mezi letouny tak, aby byla zajištěna bezpečnost provozu. Stanovení velikosti bezpečnostních zón je popsáno v sekci 4.5.1. Velikosti bezpečnostních zón jsou při zohledněny detekci kolizí.

Tím, jak se promítá nepřesnost odhadovaného letového plánu do detekce se zabývá sekce 4.5.2.



Obrázek 4.9: Histogram absolutních hodnot odchylek detekovaného azimutu od reference

4.5.1 Určení velikosti bezpečnostní zóny

Velikost bepečnostních zón byly stanoveny na základě platných zákonů pro letectví. Letecké předpisy stanovují pro let za pravidel VFR tak pro let za pravidel IFR minimální rozestupy mezi letouny:

"*v prostorech, kde se k vyjádření nadmořské výšky používají metry a kde se na základě regionálních leteckých dohod používá minimum vertikálního rozstupu 300 m mezi 8 900 m a 12 500 m včetně.*"[4],

"*v prostorech, kde se k vyjádření nadmořské výšky používají stopy a kde se na základě regionálních leteckých dohod používá minimum vertikálního rozstupu 1 000 ft mezi FL 290 a FL 410 včetně.*[2] "[4],

"*Minimum vertikálního rozstupu (VSM) musí být a) 300 m (1000 ft) pod FL 290 a 600 m (2000 ft) v této letové hladině nebo nad ní, s výjimkou uvedenou v b) níže; a, b) ve stanoveném vzdušném prostoru, který je předmětem regionálních postupů ICAO: 300 m (1000 ft) pod FL 410 nebo vyšší hladinou, kde je tak předepsáno pro použití za stanovených podmínek, a 600 m (2000 ft) v této letové hladině nebo nad ní.*"[4].

Hodnota minimálního rozestupu mezi letadly byla použita pro vytyčení bezpečnostní zóny kolem letadla. Přiblížení dvou letadel na vzdálenost kratší, než je hodnota minimálního rozestupu stanoveného leteckými předpisy je považováno za rizikové.Letecké předpisy se o

[2] 1000 ft = 304.8 m, FL 290 = 8839.2m, FL 410 = 12496.8m, (FL / 100 = ft)

rozestupech horizontálních nezmiňují. Hodnota horizontálního rozestupu 600 m byla určena na základě odborného odhadu a bude upravena na základě nepřesnosti detekce letounů.

V návrhu je s těmito minimálními vzdálenostmi počítáno v podobě tzv. bezpečnostní zóny. Při predikci kolizí je s touto zónou počítáno a ke změně letového plánu se přistupuje v případě, že by mělo dojít při současném letovém plánu k překřížení bezpečnostních zón letounů. Tato zóna má tvar válce, který má výšku 300 m a průměr podstavy 600 m.

4.5.2 Vliv nepřesností na detekci kolize

Vstupní data, ze kterých vychází predikce kolizí jsou, jak bylo ověřeno v sekci 4.3, zatížena chybou. Tato chyba je pak ve výpočtech propagována dále. Tuto skutečnost zohledňuje zákon o propagaci nejistot. Zákon o propagaci nejistot je dán vztahem

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^{m} (\frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i})^2, \tag{4.15}$$

kde u_y je výsledná nejistota, f je funkce, která určuje hodnotu měřené veličiny, x_i je veličina, ze které je výsledná počítána a u_{x_i} je nejistota konkrétní veličiny, ze které je výsledná počítána.

Pro predikci pohybu detekovaných letadel je používán Taylorův rozvoj druhého řádu. Vztah 4.10 má tedy tvar

$$\tilde{f}(t) = \triangle^{(0)} f(t_k) + \triangle^{(1)} f(t_k) + \triangle^{(2)} f(t_k), \tag{4.16}$$

kde $\tilde{f}(t)$ je funkce f z předchozího vztahu a $f(t_k)$ je funkce f v čase k. Dosazením 4.11, 4.12 a 4.14 do 4.16 dostáváme

$$\tilde{f}(t) = f(t_k) + \frac{f(t_k) - f(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} + (f(t_k) - f(t_{k-1}))^2 . \tag{4.17}$$

Pro známou periodu vzorkování - jedné sekundy lze předchozí vztah zjednodušit na

$$\tilde{f}(t) = f(t_k) + f(t_k) - f(t_{k-1}) + (f(t_k) - f(t_{k-1}))^2 , \tag{4.18}$$

z čehož vyplývá přehledné

$$\tilde{f}(t) = f(t_k)^2 + f(t_{k-1})^2 - 2f(t_k)f(t_{k-1}) + 2f(t_k) - f(t_{k-1}). \tag{4.19}$$

Pro měření výšky můžeme rovnou rovnici 4.19 dosadit do zákona o šíření chyb 4.15 a rovnou dostáváme

$$u_{vyska} = 364m, \tag{4.20}$$

pro standardní nejistotu určení výšky a

$$u_{vyska} = 692m, \tag{4.21}$$

pro rozšířenou nejistotu s rozšiřujícím koeficientem 2.

Při určování nejistot určení zeměpisné šířky a zeměpisné délky je třeba vzít v úvahu dodatečný výpočet souřadnic. Z jednotky Zaon XRX získáváme informace o vzdálenosti a

azimutu. Relativní poloha detekovaného letadla v těchto dvou souřadnicích je tedy vypočítána konverzí z polárních souřadnic do kartézských. Tyto převody jsou:

$$a = r \sin \theta \tag{4.22}$$

a

$$b = r \cos \theta, \tag{4.23}$$

kde a a b jsou zeměpisné šířky a délky, r je naměřená vzdálenost a θ je detekovaný relativní azimut.

Po dosazení do zákona o šíření chyb 4.15 získáváme:

$$u_z = 2296m, \tag{4.24}$$

pro standardní nejistotu a

$$u_z = 4365m, \tag{4.25}$$

pro rozšířenou nejistotu s rozšiřujícím koeficientem 2, kde u_z je nejistota jak pro zeměpisnou šířku, tak pro zeměpisnou délku.

Z vypočítaných hodnot vyplývá, že bezpečné rozestupy stanovené v sekci 4.5.1 jsou nevyhovující a je třeba je upravit.

Bylo vytvořeny dva rozměry bezpečnostních zón. První o šířce 2296 m a výškou 364 m. Druhý o šířce 4365 m a výškou 692 m.

4.6 Přeplánování letového plánu

Po detekci kolize je informace o kolizi předávána komponentě Agenftly Collision solver manager, který za použití dostupných manévrů změní letový plán tak, aby nedošlo ke kolizi.

Algoritmus plánování manévrů použitý komponentou CSM funguje na principu jediného A* progresivního prostorového plánování. Úloha je definována nad spojitým stavovým prostorem plánů. Je nutné tedy provést vhodnou diskretizaci. Diskretizace spojitého plánu je zde provedena jeho rozdělením na několik navazujících manévrů. Každý manévr je definován počáteční pozicí v prostoru a normalizovaným směrovým vektorem d, většina manévrů má také dodatečné parametry. Každý manévr má definovány vztahy pro výpočet koncového bodu manévru a koncového směrového vektoru. Každý manévr také definuje vztah pro výpočet délky manévru.

Rozvíjení dle A* algoritmu, tj. dle součtu ceny cesty a odhadu ceny do koncového bodu (heuristiky). Cena cesty g je vypočtena jako délka manévrů vč. aktuálního manévru. Hodnota heuristiky h je vypočtena jako délka teoretického složeného manévru letu mezi dvěma body z koncového bodu aktuálního manévru do koncového bodu úlohy hledání cesty [12].

Manévr přímého letu Základním manévrem je přímý let po přímce. Dodatečným parametrem je délka manévru

Manévr zatočení Manévr zatočení odpovídá letu po části kružnice o konstantním poloměru a určeném úhlu beze změny letové hladiny. Zápornými hodnotami poloměru se vyjadřuje levotočivé zatočení, kladnými pravotočivé. Manévr je horizontální.

Manévr stoupání nebo klesání Manévr odpovídá letu po části kružnice o konstantním poloměru a určeným úhlu kolmé k rovině letové hladiny. Kladné hodnoty poloměru odpovídají manévru stoupání, záporné hodnoty manévru klesání. Manévr je vertikální.

Manévr letu po spirále Manévr odpovídá stoupavému nebo klesavému letu po spirále. Počáteční a koncový bod mají stejnou x-ovou a y-ovou pozici v prostoru, mění se pouze letová hladina (z-ová souřadnice).

Detailní popis manévrů včetně jejich kombinací a matematického podkladu se podrobně zabývá diplomová práce Antonína Komendy [12].

4.6.1 Určení velikosti dynamické bezletové zóny

Velikost dynamická bezletové zóny je určena na základě rychlosti obou letounů, nepřesnosti predikce letového plánu a velikosti bezpečnostních zón letounů. Koeficienty byly stanoveny metodou postupné aproximace.

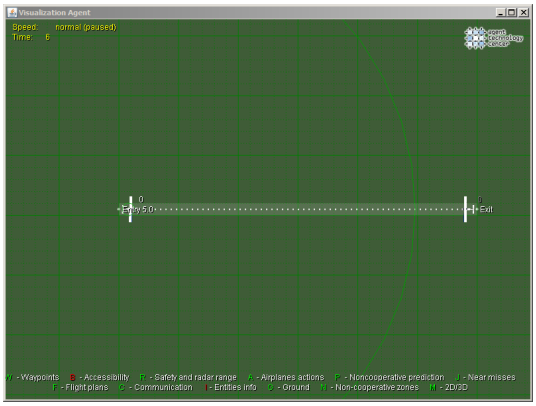
Kapitola 5

Simulace

Funkčnost Lineárního a Taylorova algoritmu byla ověřena na třech simulačních scénářích - 1)vstřícný let dvou letadel, 2) vstřícný let čtyř letadel a 3) vstřícný let deseti letadel. Při simulaci se podmínka rozšířené nejistoty a tedy větších bezpečnostních a dynamických bezletových zón ukázala jako zbytečná. Po úspěšnosti simulace s menší bezpečnostní zónou bylo od testování s bezpečnostní zónou rozšířenou upuštěno. Velikost bezpečnostních zón byla, vypočtena v sekci 4.5.2. Velikost bezpečnostních zón je 364 metrů vertikálně a 2296 metrů horizontálně pro všechny scénáře.

5.1 Vstřícný let dvou letadel

Vstřícný let dvou letadel je let dvou letadel se stejným letovým plánem s vzájemně opačným směrem. Letadla začínají od sebe ve vzdálenosti 6 kilometrů v stejné letové hladině (obrázek č. 5.1). Počáteční rychlost letadel je 210 kilometrů v hodině.

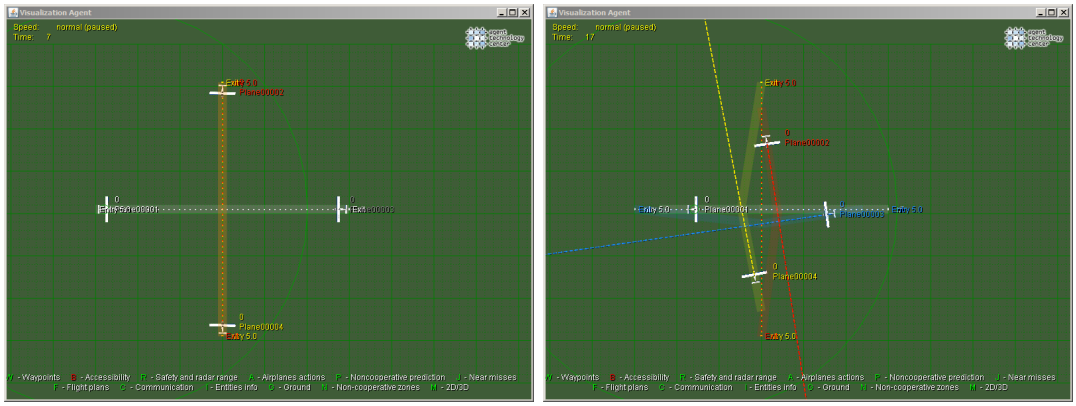


Obrázek 5.1: Simulace vstřícného letu dvou letadel.
(Z ilustračních důvodů nejsou letadla v měřítku)

Jak při použití Lineárního prediktoru, tak při použití Taylorova prediktoru proběhlo dvacet běhů simulace vstřícného letu dvou letadel z dvaceti bez kolizí a narušení bezpečnostních zón.

5.2 Vstřícný let čtyř letadel

Vstřícný let čtyř letadel je let čtyř letadel, kde dvě dvojice letadel mají stejný letový plán s vzájemně opačným směrem. Letadla jsou ve výchozí pozicích umístěny ve stejné letové hladině na obvodu kružnice s poloměrem tří kilometrů, viz obrázek č. 5.2. Všechny původní letové plány se kříží ve středu výše zmíněné kružnice. Počáteční rychlost letadel je 210 kilometrů v hodině.



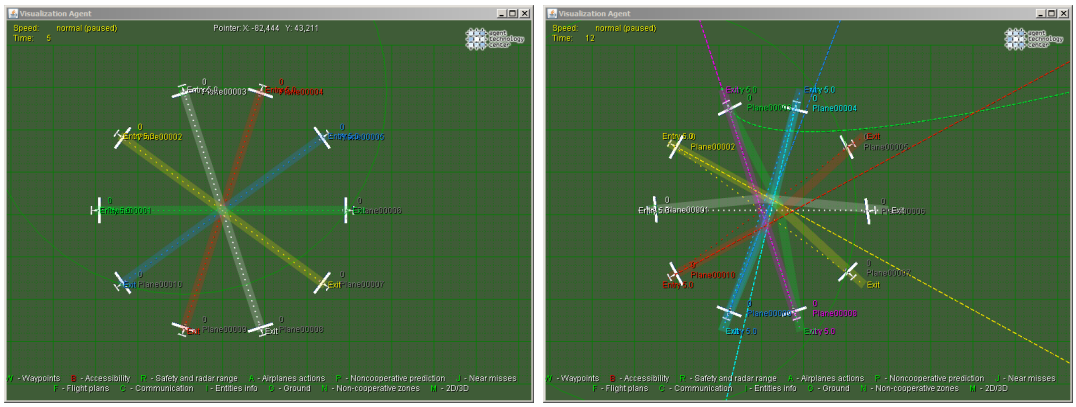
Obrázek 5.2: Simulace vstřícného letu čtyř letadel.
(Z ilustračních důvodů nejsou letadla v měřítku)

Použití Lineárního prediktoru v scénáři vstřícného letu čtyř letadel odhalilo jeho nedostatky. Chyba predikce způsobila z dvaceti běhů jedenáct narušení bezpečnostních zón. Použití Tayorova prediktoru při simulaci vstřícného letu čtyř letadel vedlo na jedno narušení bezpečnostní zóny a žádnou kolizi z dvaceti běhů simulace. Rozměry bezpečnostních zón jsou nadhodnoceny z důvodu nepřesnosti určení polohy letadla jednotkou Zaon XRX. Zaznamenané narušení bezp. zóny tedy není považováno za významné.

5.3 Vstřícný let deseti letadel

Vstřícný let deseti letadel je let deseti letadel, kde pět dvojic letadel mají stejný letový plán s vzájemně opačným směrem. Letadla jsou v počáteční pozici na stejné letové hladině a jsou umístěny po obvodu kružnice s poloměrem tři kilometry. Počáteční rychlost letadel je 210 kilometrů v hodině a letadla jsou orientována směrem do středu kružnice. Výchozí pozice letadel je zachycena na obrázku číslo 5.3. Všechny původní letové plány se kříží ve své polovině v totožném bodu v prostoru, který je současně středem výše zmíněné kružnice.

Simulace vstřícného letu deseti letadel proběhla ze všech simulací s nejhoršími výsledky.Ve scénáři vstřícného letu deseti letadel došlo při použití lineárního prediktoru v jedenácti z dvaceti běhů ke kolizi a v čtrnácti z dvaceti k narušení bezpečnostních zón. Za totožných podmínek ve stejném scénáři, ale použití Taylorova prediktoru, došlo z dvaceti simulací v třinácti případech k narušení bezpečnostních zón a v dvou případech z dvaceti ke kolizi.



Obrázek 5.3: Simulace vstřícného letu deseti letadel.
(Z ilustračních důvodů nejsou letadla v měřítku)

Kapitola 6

Závěr a budoucí práce

6.1 Zhodnocení

Cíle dosažené v rámci této práce se dají shrnout do následujících bodů:

Problematika provozu malých civilních letounů

Přehled problematiky provozu malých letounů je v sekci 2.4. Typy přístupů řešení kolizních situací byly popsány v sekci 2.1. Zvýšení bezpečnosti provozu malých civilních letounů se dosahuje pomocí technických prostředků jako jsou přístroje navigace nebo detekce letounů popsaných v sekci 2.3. Mimo technických prostředků je zaveden systém rozdělení vzdušného prostoru do částí s lišícími se pravidly provozu. Klasifikace vzdušného prostoru je popsána v sekci 2.2.1.

Implementace přenosových protokolů

Implementovány byly dva přenosové protokoly 1) přenosový protokol mezi palubním zařízením typu glass cockpit Integra TL-6624 a systémem Agentfly, 2) přenosový protol mezi pasivní jednotkou detekce letounů Zaon XRX a systémem Agentfly.

Implementace byla realizována jako moduly systému Agentfly v jazyce JAVA. Moduly realizující komunikaci byly přizpůsobeny pro dva operační systémy - Linux (běžící na platformě Gumstix Overo Earth Storm COM a testovacích počítačích) a Windows 7 (běžící na testovacích počítačích a pracovní stanici, kde byly moduly vyvinuty. Moduly komunikace byly začleněny do systému Agentfly tak, aby bylo možné jejich činnost simulovat ve virtuálním prostředí systému Agentfly bez potřeby fyzického zařízení. Navíc byly vytvořeny samostatně spustitelné verze těchto modulů. Tyto verze byly využity k záznamu naměřených dat pro následnou analýzu.

Návrh algoritmu pro detekci kolizí

Na základě statistického zpracování naměřených dat detekce letounů byly upraveny dva algoritmy detekce kolizí pro problematiku malých letounů v systému Agentfly 1) Lineární 2) Taylorův.

Lineární prediktor predikuje letový plán detekovaných letounů na základě lineární interpolace jejich posledních dvou detekovaných pozic.

Taylorův prediktor predikuje letový plán na základě rozvoje podle taylorova polynomu, zvlášť pro každou ze tří souřadnic kartézského souřadnicového systému.

Nepřesnost určení poloh detekovaných letounů byla zohledněna úpravou velikosti bezpečnostních zón a velikosti dynamických bezletových zón.

Ověření navrženého algoritmu v simulaci a reálném provozu

Navržený algoritmus detekce kolizí (4.4 a 4.5) byl ověřen v simulací na vybraných scénářích s dobrými výsledky. Scénáře vstřícného letu dvou a čtyř letadel proběhl bez kolizních situací a významného narušení bezpečnostních zón. Ve scénáři vstřícného letu 10 letadel docházelo opakovaně jak k narušení bezpečnostních zón letadel, tak k jejich kolizím. Scénář vstřícného letu 10 letadel je předimenzovanou situací ke které v provozu nedochází. Nepřikládá se tedy kolizím v tomto scénáři velký význam.

Lineární prediktor se ukázal jako nevhodný pro predikci letu letounu, který často mění směr svého letu. Taylorův prediktor za stejných podmínek vykazoval významně lepších výsledků.

Z důvodu nepříznivých meteorologických podmínek přetrvávajících od počátku do poloviny tohoto roku nebylo k dispozici dostatečné množství letových hodin. Z tohoto důvodu nebylo provedeno ověření algoritmů v reálném provozu a je otázkou budoucí práce.

6.2 Budoucí práce

Ověření v reálném prostředí

Zmrzlá nezpevněná vzletová dráha na začátku roku a vytrvalé deště v následujícím období poskytly nedostatečné množství letových hodin. Z tohoto důvodu nebylo možné ověřit funkci navrženého algoritmu v reálném prostředí. Ověření v reálném prostředí potvrdí, nebo vyvrátí závěry vyvozené z simulací.

Zpřesnění predikčního modelu

Návrh predikce kolizních situací v této práci vychází z poměrně malého souboru naměřených dat. Pro zmenšení vlivu statistické chyby na model predikce kolizních situací je potřeba provést více testovacích letů a větší soubor dat znovu analyzovat.

Vzdálenost letadel při testovacích letech nepřekročila hranici čtyř kilometrů. Tato vzdálenost spadá do nepřesnějšího rozsahu jednotky Zaon XRX. Pro úplnější model predikce je potřeba provést testovací lety se vzdáleností letadel v dalších dvou rozsazích jednotky Zaon XRX. Pro vylepšení predikčních schopností stávajícího modelu je potřeba zohlednit naměřená data i pro zbývající rozsahy.

Nepřesnost predikce v závislosti na vzájemné orientaci letounů

V této práci bylo zanedbáno proměnné přesnosti určení azimutu na základě relativní vzájemné orientace letounů. K statistickému zpracování nepřesnosti určení azimutu na základě vzájemné orientace letounů je potřeba většího souboru dat: tedy dalších testovacích letů. Zohlednění tohoto faktoru přispěje k zpřesnění predikce kolizí.

Vliv nepřesnosti v závislosti na náklonu letadla

Vzhledem k konstrukčnímu řešení směrových antén jednotky Zaon XRX a umístění v letadle, je možné že náklon letadla nesoucí jednotku Zaon XRX bude mít vliv na přesnost detekce okolních letounů. Pokud náklon letadla má vliv na přesnost detekce letounu, přispěje se zahrnutím náklonu letadla do modelu predikce k jeho zpřesnění.

Seznam použitých zkratek

AGL Zkratka pro anglické above ground level, v překladu výška nad zemí.

ATS Air traffic services - letové provozní služby.

CRT Řízený okrsek (angl. Control Zone, zkratka CTR) je výraz pro úsek vzdušného prostoru obvykle ve tvaru válce v těsném okolí letiště s řízeným provozem. Slouží k ochraně provozu na letištích
a letadel letících po okruhu.

CRC je anglická zkratka pro cyclic redundancy check. V češtině cyklický redundantní součet. CRC o hašovací funkcí, použí vaná k detekci chyb dat během přenosu či ukládání dat. CRC-16 označuje 17ti bitový cyklický redundantní součet.

EFIS EFIS je zkratkou pro anglické electronic Flight Instrument Systems. EFIS jsou zařízení určená k zobrazování a monitorování průběhu letu a stavu komponent letadla v jednoduché a lehce srozumitelné podobě na jedné obrazovce.

EMS anglická zkratka pro engine monitoring system.

GLONASS ruská zkratka pro Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. V definicích Leteckého zákona a jeho Leteckých předpisů [4] není definován český ekvivalent k anglickému názvu. GLONASS je družicový navigační systém provozovaný Ruskou federací [4]

GNSS anglická zkratka pro global navigation satellite system. V češtině se používá označení Globální družicový navigační systém. GNSS je celosvětový systém pro určování polohy a času, který zahrnuje konstelaci jedné nebo více družic, letadlových přijímačů a monitorování integrity systému. Tento systém je velice rozšířený. Využívá se, je-li to nezbytné, k podpoře požadované navigační výkonnosti pro určitý provoz [4].

GPS Anglická zkratka pro Global positioning system. V češtině používané označení je globální navigační systém. GPS je družicový navigační systém provozovaný Spojenými státy [4].

VOR VHF Omnidirectional Radio Range

VHF zkratka pro Very High Frequency, viz VKV.

VKV Velmi krátké vlny (zkratka VKV nebo též VHF z anglického Very High Frequency) je oblast elektromagnetického záření používaná především pro přenos rozhlasového a radiového signálu v atmosféře.

ICAO International Civil Aviation Organization - Mezinárodní organizace pro civilní letectví je mezivládní organizace přidružená k OSN, která pomáhá regulovat mezinárodní civilní letectví [13].

MSB MSB je zkratka anglického most significant bit, v českém jazyce: bit nejvyššího významu.

OSN Organizace spojených národů je mezinárodní organizace, založena roku 1945 po 2. světové válce, jejíž zakládajícími členy je 51 států. Cílem OSN je udržení mezinárodního míru a bezpečnosti, rozvoj přátelských vztahů mezi národy a propagování sociálního rozvoje, lepších životních standardů a lidských práv. Anglický název: United Nations, zkráceně UN [14].

IFR Anglická zkratka pro instrument flight rules. Symbol používaný k označení pravidel pro let podle přístrojů. Všechna pravidla pro let podle přístrojů jsou stanovena v leteckých předpisech ČR.[4]

Let IFR (IFR flight) Let prováděný v souladu s pravidly pro let podle přístrojů[4]

VFR Anglická zkrakta pro visual flight rules. Symbol používaný k označení pravidel letu za viditelnosti. Všechna pravidla pro let za viditelnosti jsou stanovena v leteckých předpisech ČR.[4]

VMC je zkratka pro anglické visual meteorological conditions, český termín je meteorologická minima. Jde o soupis kritérií, používaných za letů VFR při, kterých mají piloti dostatečnou viditelnost pro udržení dostatečného odstupu od ostatních letadel, letounů a země. Přesná kritéria se liší podle třídy vzdušného prostoru, zda je den, či noc a podle jednotlivých států.

Let VFR (VFR flight) - Let prováděný v souladu s pravidly pro let za viditelnosti [4].

FL Letová hladina (FL) (Flight level)Hladina konstantního atmosférického tlaku, vztažená ke stanovenému základnímu údaji tlaku 1013,2 hektopascalů (hPa) a oddělená od ostatních takových hladin stanovenými tlakovými intervaly.[4]

ft je zkratka pro jednotku délky. V angličtině feet, v češtině stopa. Platí 1 m = 3,281 ft

NGA je zkratkou pro National Geospatial-Intelligence Agency, neoficiální český překlad: Národní geozpravodajská agentura

NM NM je zkratka pro anglický výraz nautical mile. V češtině námořní míle a platí 1 NM = 1852 m

SIF Kód SIF je čtyřmístné identifikační číslo rovněž označováno jako squawk nebo alfa. Podrobněji je SIF rozebírán v sekci 2.3.2 a 2.3.3.

SPS zkratka anglického Standard Positioning Service. V češtině Služba standardního určování polohy. Jde o veřejně dostupnou službu určování polohy systému GPS.

TMA Koncová řízená oblast (angl. Terminal Control Area nebo Terminal Maneuvering Area, zkratka TMA) je část vzdušného prostoru v okolí letiště, která slouží k ochraně přibližujících se a odlétajících letadel.

TA ČR Technologická agentura České republiky.

PPS je zkratkou anglického označení Precise Positioning Service pro Službu přesného určování polohy. Službu PPS jsou schopny využívat autorizovaní uživatelé, tedy vojenský sektor USA a vybrané spojenecké armády. Služba PPS je přesnější než služba SPS GPS.

UN Viz OSN.

USAF Letectvo Spojených států amerických (anglicky United States Air Force; USAF)

Kapitola 7

Přílohy

7.1 Tabulka cestovních hladin bod a)

RVSM - STOPY

a) v prostorech, kde se k vyjádření nadmořské výšky používají stopy a kde se na základě regionálních leteckých dohod používá minimum vertikálního rozstupu 1 000 ft mezi FL 290 a FL 410 včetně:*

Trať **											
Od 000 stupňů do 179 stupňů ***						Od 180 stupňů do 359 stupňů ***					
Lety IFR			Lety VFR			Lety IFR			Lety VFR		
	Hladina			Hladina			Hladina			Hladina	
FL	stopy	metry	FL	stopy	metry	FL	stopy	metry	FL	stopy	metry
010	1 000	300	-	-	-	020	2 000	600	-	-	-
030	3 000	900	035	3 500	1 050	040	4 000	1 200	045	4 500	1 350
050	5 000	1 500	055	5 500	1 700	060	6 000	1 850	065	6 500	2 000
070	7 000	2 150	075	7 500	2 300	080	8 000	2 450	085	8 500	2 600
090	9 000	2 750	095	9 500	2 900	100	10 000	3 050	105	10 500	3 200
110	11 000	3 350	115	11 500	3 500	120	12 000	3 650	125	12 500	3 800
130	13 000	3 950	135	13 500	4 100	140	14 000	4 250	145	14 500	4 400
150	15 000	4 550	155	15 500	4 700	160	16 000	4 900	165	16 500	5 050
170	17 000	5 200	175	17 500	5 350	180	18 000	5 500	185	18 500	5 650
190	19 000	5 800	195	19 500	5 950	200	20 000	6 100	205	20 500	6 250
210	21 000	6 400	215	21 500	6 550	220	22 000	6 700	225	22 500	6 850
230	23 000	7 000	235	23 500	7 150	240	24 000	7 300	245	24 500	7 450
250	25 000	7 600	255	25 500	7 750	260	26 000	7 900	265	26 500	8 100
270	27 000	8 250	275	27 500	8 400	280	28 000	8 550	285	28 500	8 700
290	29 000	8 850				300	30 000	9 150			
310	31 000	9 450				320	32 000	9 750			
330	33 000	10 050				340	34 000	10 350			
350	35 000	10 650				360	36 000	10 950			
370	37 000	11 300				380	38 000	11 600			
390	39 000	11 900				400	40 000	12 200			
410	41 000	12 500				430	43 000	13 100			
450	45 000	13 700				470	47 000	14 350			
490	49 000	14 950				510	51 000	15 550			
atd.	atd.	atd.				atd.	atd.	atd.			

* Mimo případů, kdy se na základě regionálních leteckých dohod použije upravená tabulka cestovních hladin, která je založená na nominálním minimu vertikálního rozstupu 300 m (1 000 ft), za specifických podmínek pro letadla letící nad FL 410 v určených částech vzdušného prostoru.

** Magnetická trať nebo v polárních oblastech nad zeměpisnou šířkou 70 stupňů a v takovém rozsahu k těmto oblastem, které mohou stanovit příslušné úřady ATS, síť tratí jak je určena sítí čar rovnoběžných s Greenwichským poledníkem přenesených na mapu polární stereografické projekce, na které se směr k Severnímu pólu vyjadřuje síťovým severem.

*** Mimo případů, kdy je na základě regionálních leteckých dohod od 090 do 269 stupňů a od 270 do 089 stupňů předepsáno přizpůsobit je převládajícímu směru provozu a jsou stanoveny příslušné specifické převodní postupy s nimi spojené.

Poznámka: Pokyny vztahující se k vertikálnímu rozstupu jsou obsaženy v Manual on Implementation of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive (*ICAO Doc 9574*).

Tabulka 7.1: Tabulka cestovních hladin bod a)

7.2 Obsah přiloženého CD

Na přiloženém disku je kopie této práce, zdrojové kódy v jazyce JAVA, jejich konfigurační soubory XML a záznamy experimentů. Disk je rozdělen do několika složek:

Text
obsahuje tuto práci ve formátu pdf

Zdrojové kódy
obsahuje zdrojové kódy implementace v jazyce JAVA

Konfigurační soubory
obsahuje konfiguracní soubory ke zdrojovým kódům v formátu XML

Experimenty
obsahuje naměřená data z letů

Práce byla implementována v rámci systému AgentFly. Sytém AgentFly je licencován. Není jej tedy možné umístit na přiložený disk. Zdrojové kódy umístěné na přiloženém disku není možné samostatně spustit.

Literatura

[1] Zaon xrx owner's manual. zaon flight systems 2011.
http://www.zaon.aero,2013.

[2] P. Volf. *Multiagent Simulation of Air Space and Air Traffic Management.* PhD thesis, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Cybernetics, 2013.

[3] D. Sislak. *Autonomous Collision Avoidance in Air-Traffic Domain.* PhD thesis, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Cybernetics, 2010.

[4] Elektronická podoba leteckých předpisů ČR.
http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm, stav z 19. 5. 2013.

[5] Stránky podpory předmětu Řízení letového provozu na fel Čvut.
http://radio.feld.cvut.cz/courses/37RLP/, stav z 20. 5. 2013.

[6] Stránky wikipedie o globálním pozičním systému transit/navsat.
http://cs.wikipedia.org/wiki/Transit, stav z 23. 5. 2013.

[7] Oficiální informační stránky vlády spojených států amerických o gps a průbuzných tématech.
http://www.gps.gov/, stav z 29. 5. 2013.

[8] Stránky časké wikipedie o gps.
http://cs.wikipedia.org/wiki/GPS, stav z 28. 5. 2013.

[9] Stránky letecké školy f-air.
http://www.f-air.cz/,2013.

[10] Oficiální stránky tl electronic a.s.
http://www2.tl-elektronic.cz/, stav z 20. 5. 2013.

[11] Oficiální stránky TL Eelektronic.
http://http://www2.tl-elektronic.cz/index.php?page=lsa&p_id=20&lang=cs, stav z 20. 5. 2013.

[12] A. Komenda. Použití multi-agentního systému pro nekooperativní vyhýbání letadel. Master's thesis, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Cybernetics, 2007.

[13] Oficiální stránky mezinárodní organizace pro civilní letectví (icao). http://www.icao.int/, stav z 10. 5. 2013.

[14] Oficiální stránky organizace spojených národů (osn/un). http://www.un.org/, stav z 10. 5. 2013.