

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

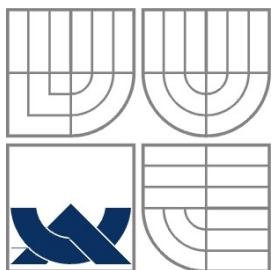
ANTI-KOLIZNÍ SYSTÉM ZALOŽENÝ NA GPS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

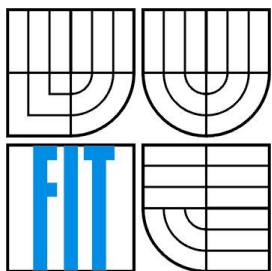
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Marek Varga

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

# ANTI-KOLIZNÍ SYSTÉM ZALOŽENÝ NA GPS

ANTI-COLLISION SYSTEM BASED ON GPS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MAREK VARGA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. FILIP ORSÁG, Ph.D.

**Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií**

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2008/2009

## Zadání diplomové práce

Řešitel: **Varga Marek, Bc.**

Obor: Inteligentní systémy

Téma: **Antikolizní systém založený na GPS**

Kategorie: Vestavěné systémy

Pokyny:

1. Prostudujte literaturu týkající se GPS a bezdrátových sítí s větším dosahem.
2. Navrhněte způsob předávání GPS koordinát jednotlivých modulů mezi sebou (informování každého modulu, kde se nachází) pomocí bezdrátové sítě s větším dosahem. Cílem je předávání informací, zda nejsou moduly v kolizních drahách.
3. Navržené řešení implementujte.
4. Předvedte funkčnost, proveďte experimenty a dosažené výsledky zhodnoťte.

Literatura:

- Dle specifikace školitele a průmyslového zadavatele.
- <http://www.flarm.com/>

Při obhajobě semestrální části diplomového projektu je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci ročníkového a semestrálního projektu (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.


Vedoucí: **Orság Filip, Ing., Ph.D.**, UITS FIT VUT

Konzultant: Smolík Luděk, Dr.

Datum zadání: 22. září 2008

Datum odevzdání: 26. května 2009

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav inteligentních systémů  
602 00 Brno, Božetěchova 2

  
doc. Dr. Ing. Petr Hanáček  
vedoucí ústavu

## **Abstrakt**

Letecký průmysl se neustále setkává s potřebou zvýšení bezpečnosti a to nejen v případě velkých strojů, ale i malých letadel. Za účelem informovat pilota o hrozícím nebezpečí popřípadě o poloze ostatních letadel vznikla řada systémů.

Hlavním cílem je sestavit zařízení, které využívá globálního polohového systému pro určení pozice a předává koordináty pomocí bezdrátových sítí k následnému určení kolizí. Podrobně je popsána funkce GPS družic a přijímačů, bezdrátového odesílání dat, výpočtu kolizí a synchronizace jednotlivých modulů.

## **Abstract**

Aircraft industry is constantly facing the need to increase security not only in the case of large machines, but also in the small aircraft. Many systems were established in order to inform the pilot of the impending hazard, where appropriate, about the location of the other aircraft.

The main objective is to establish a facility which uses global position system for determining the position and imparts coordinates using wireless networks for subsequent determination of collision. The functions of satellites and GPS receivers, sending wireless data and collision calculation and synchronization of individual modules is described in detail.

## **Klíčová slova**

kolize, GPS, protokol, koordináty, NMEA

## **Keywords**

collision, GPS, protocol, coordinates, NMEA

## **Citace**

Marek Varga: Antikolizní systém založený na GPS, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2009

# Antikolizní systém založený na GPS

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Filipa Orsága, Ph.D.

.....  
Marek Varga  
15. května 2009

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Filipu Orságovi Ph.D. za poskytnutí cenných rad při řešení problémů a za poskytnuté informace pro vývoj systému.

© Marek Varga, 2009

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*



# Obsah

|   |    |
|---|----|
| Obsah.....  | 1  |
| 1 Úvod.....   | 3  |
| 1.1 Motivace a cíle.....                                    | 3  |
| 1.2 Rozdělení systému.....                                  | 4  |
| 2 Družicové určování polohy.....                            | 5  |
| 2.1 Radiové vysílání.....                                   | 5  |
| 2.1.1 Rozdělení systému.....                                | 6  |
| 2.2 Globální družicové polohové systémy.....                | 7  |
| 3 Systém GPS.....   | 8  |
| 3.1 Historie.....   | 9  |
| 3.2 Princip činnosti.....                                   | 9  |
| 3.3 Prvky GPS systému.....                                  | 10 |
| 3.3.1 Kosmický segment.....                                 | 11 |
| 3.3.2 Řídící segment.....                                   | 12 |
| 3.3.3 Uživatelský segment.....                              | 13 |
| 3.4 Diferenciální GPS.....                                  | 14 |
| 3.5 Přesnost a použitelnost.....                            | 14 |
| 3.5.1 Efemeridy.....  | 15 |
| 3.5.2 Družicové hodiny a relativistické efekty.....         | 15 |
| 3.5.3 Ionosférická a troposférická refrakce.....            | 16 |
| 3.5.4 Přijímač a vícecestné šíření signálu.....             | 16 |
| 3.5.5 Geometrické rozmístění družic.....                    | 16 |
| 3.5.6 Selektivní dostupnost (selective availability).....   | 17 |
| 3.5.7 Sagnacovo zakřivení.....                              | 17 |
| 3.6 Standard NMEA.....                                      | 17 |
| 3.6.1 RMC věty.....   | 19 |
| 3.6.2 GGA věty.....   | 19 |
| 3.6.3 GSA věty.....   | 20 |
| 3.6.4 GSV věty.....   | 21 |
| 4 Algoritmy detekce kolizí.....                             | 22 |
| 4.1 Model prostředí.....                                    | 22 |
| 4.1.1 2D model okolí.....                                   | 22 |
| 4.1.2 3D model okolí.....                                   | 22 |
| 4.2 Metody výpočtu kolizí.....                              | 23 |
| 4.2.1 Kolize ve 2D modelu.....                              | 24 |
| 4.2.2 Kolize ve 3D modelu.....                              | 25 |
| 4.3 Předzpracování GPS dat.....                             | 26 |
| 4.3.1 Sférická souřadnicová soustava.....                   | 26 |
| 4.3.2 Vztah sférické a kartézské souřadnicové soustavy..... | 26 |
| 4.3.3 Koule, elipsoid a geoid jako model země.....          | 27 |
| 4.4 Kolizní model a algoritmy.....                          | 28 |
| 4.5 Užití konvenčních algoritmů.....                        | 28 |
| 4.5.1 Obalové těleso.....                                   | 28 |
| 4.5.2 Kolize trojúhelníku a přímky.....                     | 28 |
| 4.5.3 Kolize trojúhelníků.....                              | 30 |
| 4.6 Predikce kolizí.....                                    | 33 |
| 4.6.1 Obalové těleso.....                                   | 33 |

|   |    |
|---|----|
| 4.6.2 Směrová predikce.....             | 34 |
| 4.7 Použité algoritmy.....              | 37 |
| 5 Předávání koordinátů.....             | 39 |
| 5.1 Prostředí.....                      | 39 |
| 5.2 Model komunikace.....               | 40 |
| 5.2.1 Model klient - server.....        | 40 |
| 5.2.2 Model peer to peer.....           | 41 |
| 5.3 Komunikační schéma.....             | 42 |
| 5.3.1 Vlastnosti schématu.....          | 42 |
| 5.4 Návrh protokolu.....                | 43 |
| 5.4.1 Vlastnosti protokolu.....         | 44 |
| 5.4.2 Kolize vysílání.....              | 44 |
| 5.5 Struktura rámce.....                | 45 |
| 5.5.1 Kolizní signál.....               | 45 |
| 6 Realizace systému.....                | 47 |
| 6.1 Mikrokontroler.....                 | 48 |
| 6.2 STM32 primer.....                   | 48 |
| 6.2.1 Standard IEEE 754.....            | 49 |
| 6.2.2 Systém přerušení.....             | 51 |
| 6.2.3 Použití sériových linek.....      | 51 |
| 6.2.4 Display.....                      | 51 |
| 6.3 GPS přijímač.....                   | 52 |
| 6.4 Vysílač a přijímač.....             | 52 |
| 6.4.1 Separované moduly.....            | 52 |
| 6.4.2 Časový multiplex.....             | 53 |
| 6.5 Implementace.....                   | 53 |
| 6.5.1 Jádro programu.....               | 53 |
| 6.5.2 Moduly programu.....              | 55 |
| 6.6 Hardware.....                       | 56 |
| 7 Návrh dalšího vývoje programu.....    | 57 |
| 8 Závěr.....                            | 58 |
| Literatura.....                         | 59 |
| Seznam příloh.....                      | 60 |
| A Uživatelský manuál.....               | 61 |
| A.1 STM32 primer.....                   | 61 |
| A.2 Instalace vývojového prostředí..... | 61 |
| A.3 Propojení komponent.....            | 62 |
| A.4 Práce v prostředí.....              | 62 |
| A.5 Ovládání systému.....               | 63 |
| B Obsah příloženého CD.....             | 64 |

# Kapitola 1

## Úvod

Systémy řešící kolize v prostoru jsou důležitým prvkem, bez kterého by se nejedno odvětví průmyslu neobešlo. Všeobecně se vždy jedná o celek, jež ze známých informací o svém okolí vyvozuje důsledky pro pohyb v daném prostředí tak, aby nedošlo ke srážce a tedy i ke škodám.

Každý takový systém musí mít alespoň nějaké informace o svém okolí. V určitých případech stačí pouze znalost nejbližšího okolí, ale někdy je nutná znalost rozsáhlé oblasti. Vždy je ovšem podstatné znát potřebné okolí a z něj vyplývající rizika kolize.

K určení, zda v daný okamžik je objekt na dráze, která směřuje ke kolizi je velice důležité znát polohu a směr, kde a kam se objekt pohybuje. K určení pozice je možné použít mnoho způsobů. V současné době je ale k dispozici pouze jeden způsob, který je funkční na celé Zemi a je k dispozici jakémukoli uživateli. Jedná se o systém GPS. Zařízení pro příjem GPS signálu je dostupné široké veřejnosti a lze pomocí takových přístrojů získat poměrně přesné informace o poloze, kde se daný přístroj nachází.

Speciálním prostředím, ať už se týká možných škod, nebo nároků na kvalitu a spolehlivost, je oblast letectví. Stroj schopný letu se musí vyhýbat nárazům jak do pevného okolí, tak do jiných letících objektů.

### 1.1 Motivace a cíle

Hlavním cílem je navrhnout a implementovat antikolizní systém, který bude použit v malém letadle. Každý stroj vybavený tímto systémem bude schopen snadno odhalit možnou kolizi s jiným strojem, nesoucím na palubě stejné zařízení. Přístroj ovšem nebude schopen zjišťovat a upozorňovat na možné kolize s okolním prostředím nebo letouny, které nejsou tímto zařízením vybaveny. Systém v aktivním stavu bude schopen varovat pilota např. v případě špatného počasí (mlha) nebo na jeho vlastní nepozornosti.

Při návrhu přístroje bude nutné vzít v úvahu účel, ke kterému je přístroj určen. Každá použitá komponenta by neměla mít příliš velké nároky na napájení a nesmí být příliš těžká. Naopak musí být spolehlivá a odolná vůči otřesům. Pro určení polohy stroje bude, dle zadání, použit přijímač GPS. Pro komunikaci by měl být použit rádiový vysílač a přijímač. Existuje několik možných variant, které je možné použít. Jedním z nejběžnějších prostředků pro komunikaci je přístroj pracující v pásmu CB (Citizen band – občanské/civilní pásmo). Je také možné použít zařízení pracující v pásmu 430 Mhz.

## 1.2 Rozdělení systému

Problematika zařízení pro určování kolizí je široká a je tedy rozdělena do několika kapitol. Samotný systém se skládá z GPS přijímače, mikrokontroleru a vysílače pro komunikaci s ostatními objekty.

Metodami funkce družicového určování polohy se zabývá druhá kapitola této práce. V této kapitole je provedeno základní rozdělení systémů pro určení polohy a je provedena stručná charakteristika GPS systému.

Základní princip činnosti GPS systému, družic i přijímačů se zabývá třetí kapitola této práce. Nejprve je popsána historie vývoje systému, jeho jednotlivé části a standardy. Následně definuje nutné kroky pro získání koordinát polohy přijímače, které budou předány pro řešení kolizí.

Ve čtvrté kapitole jsou popsány možné způsoby výpočtu kolizí v prostoru. Nejprve jsou popsány běžné metody výpočtu kolizí, z nichž jsou některé dále použity. Hlavním bodem však je predikce kolizí. Postupně jsou navrženy různě přesné a rychlé metody, ze kterých je posléze vybrána množina algoritmů, jež budou využity ve výsledném zařízení. Celý proces návrhu řešení kolizí je podřízen rychlosti výpočtu. Vybrané postupy jsou kompromisem mezi rychlostí a robustností daného řešení.

Pátá kapitola pojednává o různých síťových komunikačních modelech, jejich vlastnostech a praktické použitelnosti pro předávání koordinátů. Nad nejvhodnějším modelem je vytvořen komunikační protokol, který je podrobně popsán. Jsou navrženy postupy pro jeho praktickou implementaci do prostředí bezdrátových sítí.

Ze získaných poznatků v rámci teoretického úvodu je šestá kapitola zaměřena na praktickou implementaci navrženého systému. Nejprve jsou vyhodnoceny vlastnosti vybrané architektury, z nichž plynou některé problémy. Je navržena a použita aritmetika s desetinnou čárkou potřebná pro výpočet kolizí. Dále je popsán postup získání a transformace GPS koordinátů z daného modulu. Dle rozboru je vyřešen výpočet kolizí mezi pohybujícími se objekty a navržený komunikační protokol je převeden do praktické podoby.

Další vývoj systému je popsán v kapitole sedmé a závěrečná kapitola shrnuje problémy při řešení této diplomové práce a diskutuje výsledky práce.

Práce navazuje na závěry Semestrálního projektu, který se zabýval třemi body zadání. Jeho výsledky odpovídají zhruba druhé, třetí a páté kapitole práce, konkrétně systémy pro určení polohy, vlastnostem a standardům systému GPS a návrhu komunikačního modelu a protokolu.

# Kapitola 2

## Družicové určování polohy

Přesné určení polohy je již velmi dlouho nutnou podmínkou pro správné fungování mnoha odvětví lidské činnosti. K její dosažení se od metod používající přírodu kolem nás přešlo díky rozvoji vědy až k použití moderních způsobů, jakými je rádiová navigace a její v současné době nejmodernější metoda využívající navigační družice.

Zjednodušeně lze družicové polohové systémy popsat jako **družicový rádiový dálkoměrný** systém:

- **Dálkoměrný** systém je takový, kdy se poloha nějakého objektu určuje ze vzdáleností od bodů se známou polohou [2].
- **Rádiový** systém pro měření určitého parametru využívá rádiových vln. „Rádiový dálkoměrný“ systém k měření vzdálenosti využívá rádiových vln takto: Do bodu se známou polohou je umístěn vysílač, který vysílá rádiové vlny s časovými značkami. V bodě, jehož poloha je zjišťována bude umístěn přijímač, který porovnává časové značky se svými „hodinami“. Tím je možno změřit zpoždění, tj. jak dlouho trvalo rádiové vlně, než k přijímači dorazila. Protože se rádiové vlny pohybují známou rychlostí, stačí pro výpočet požadované vzdálenosti vynásobit změřené zpoždění touto rychlostí [2].
- **Družicový** je systém označován proto, že body se známou polohou jsou družice obíhající kolem Země [2]. Aby bylo možno určit polohu družic, musí být v jejich vysílání nejen časové značky, ale i parametry dráhy dané elipsy.

### 2.1 Rádiové vysílání

Každá družice v různých polohových systémech vysílá rádiové vlny. Aby se jednotlivé systémy vzájemně nerušily, má každý vyhrazenou frekvenci, případně smluvený způsob vysílání na stejné frekvenci. V rámci jednoho systému je několik desítek družic, aby bylo možno odlišit jednu od druhé, používá se několik metod:

- kódové - každá družice vysílá různé kódy na stejné frekvenci, které se svou charakteristikou blíží náhodnému kódu a proto se označují za PRN (Pseudo Random Numbers). Přijímač pak na základě znalosti tohoto kódu snadno zesílí hledaný signál. Využívá jej GPS a Galileo.
- frekvenční - každá družice vysílá stejné kódy na jiné frekvenci, což vyžaduje velký počet volných frekvencí.

- časové - každá družice vysílá na stejné frekvenci stejné kódy, ale v jiném čase. Tento způsob je komplikovaný na realizaci přijímače a nepoužívá se.

## 2.1.1 Určování polohy a času

Polohové systémy jsou obvykle navrženy k jednomu principiálně jednoduchému způsobu výpočtu polohy, přesto je však možno ve speciálních aplikacích uplatnit jiné přístupy [2].

### Kódová

Měření jsou jednoduchá, spolehlivá a nejčastěji používaná. Na základě časových značek a známé pozice vysílačů (družic) je možno vypočítat polohu a čas v místě přijímače.

Po přijetí rádiového signálu jsou v přijímači dekodovány:

1. časové značky při odeslání signálu každé družice ( $t$ )
2. polohy každé družice v prostoru, tzv. efemeridy ( $x, y, z$ )

Pro výpočet se používají pouze družice, které jsou nad obzorem výše než limitní hodnota, běžně se jedná o sklon  $5^\circ - 10^\circ$ . Toto opatření se nazývá elevační maska.

V případě příjmu signálu z více než 4 družic je poloha váženým průměrem tak, aby výhodná geometrická poloha družice a kvalitní rádiový signál hráli významnější roli, čímž může být výsledek výrazně stabilnější a přesnější.

### Fázová

Měření se vyznačují vysokou přesností a nejednoznačností. Je časově náročné, vyžaduje vhodné podmínky a speciální drahé aparatury. Použití je především v geodetických a vědeckých aplikacích.

Vychází z možnosti měřit jednotlivé fáze harmonických vln zdroje a jejich změny. Nejednoznačnost spočívá v neznámém počátečním celkovém počtu vln mezi vysílačem a přijímačem.

Používané metody:

- **Statická** - využívá dlouhodobá měření více referenčních přijímačů a postprocesní korekce
- **Rychlá statická** - pro měření je třeba dvojice referenčních dvoufrekvenčních přijímačů, jeden o známých souřadnicích a vyhodnocení postprocesních korekcí
- **Stop and go** - měření pracuje na principu jednoho referenčního a jednoho terénního přijímače, který vyhodnocuje fáze i během přesunu mezi měřenými stanovišti
- **Kinematická** - vyžaduje jeden terénní přijímač, který na počátku vyřeší nejednoznačnosti, nebo je schopen nejednoznačnosti úspěšně řešit i během přesunu mezi měřenými stanovišti
- **RTK (Real Time Kinematic)** - jedná se o metodu, kdy jsou jedním přijímačem v terénu zpracovávány diferenciální korekce permanentních referenčních stanic získané z geostacionární družice, rádia nebo internetu

## Dopplerovská

Měření pracuje na principu změny frekvence pro pohybující se zdroj a příjemce signálu. Na základě časových značek, poloh družic a změny frekvence se určuje obvykle poloha nebo rychlost.

## Úhломěrná

Měření vychází z možnosti zaměřovat zdroj signálu (družici) pomocí směrových antén a určit úhly vzhledem k vodorovné rovině. Provádí se k více družicím zároveň, nebo k jedné družici v různém čase.

## 2.2 Globální družicové polohové systémy

**Globální družicový polohový systém** (zkratkou GNSS) je služba umožňující za pomoci družic autonomní prostorové určování polohy s celosvětovým pokrytím. Uživatelé této služby používají malé elektronické rádiové přijímače, které na základě odeslaných signálů z družic umožňují vypočítat jejich polohu s přesností na desítky až jednotky metrů. Přesnost ve speciálních nebo vědeckých aplikacích může být několik centimetrů až milimetrů [2].

V roce 2008 byl jediný plně funkční systém provozovaný armádou Spojených států amerických NAVSTAR GPS. Ruská vláda schválila znovuoživení GNSS GLONASS do plného operačního stavu. Vývoj probíhá na evropském GNSS Galileo a čínském Compass.

### Některá literatura se zmiňuje o dvou generacích GNSS:

- **GNSS-1** Do první generace jsou zařazovány GPS a GLONASS s podpůrnými systémy SBAS, GBAS a LAAS. Tyto systémy byly prioritně vyvinuty pro vojenskou sféru a sekundárně zajišťují stálé globální pokrytí službou pro civilní sektor.
- **GNSS-2** Do druhé generace se řadí vyvíjené GNSS jako GPS-III, Galileo, Compass. Zajišťují vysokou přesnost a spolehlivost pro aplikace Safety of Life plnohodnotné pro všechny uživatele.

Tabulka 1: Přehled GNSS

| název       | princip  | stát    | inklinace | počet drah | výška orbity [km] |
|-------------|----------|---------|-----------|------------|-------------------|
| TRANSIT     | doppler. | USA     | 67°       | 3          | 1 100 LEO         |
| Parus       | doppler. | SSSR    | 83°       | 6          | 730-960 LEO       |
| Cikada      | doppler. | SSSR    | 83°       | 4          | 965 LEO           |
| Navstar GPS | kódové   | USA     | 55°       | 6          | 20 200 MEO        |
| Glonass     | kódové   | Rusko   | 65°       | 3          | 19 100 MEO        |
| Doris       | doppler. | Francie | 35-66-99° | -          | 560-825-1 340 LEO |
| Galileo     | kódové   | EU      | 56°       | 3          | 23 200 MEO        |
| Compass     | kódové   | Čína    | 55°       | ?          | 21 500 MEO        |

# Kapitola 3

## System GPS

Jediným globálním polohovým systémem, který je plně funkční po celé Zemi je zatím pouze systém GPS. I když má dnes systém GPS rozsáhlé civilní využití, nesmíme zapomínat, že se jedná primárně o vojenský systém, který byl vyvinut a je dodnes spravován ministerstvem obrany USA. Svého času proběhla ve Spojených státech amerických diskuse o jeho budoucím začlenění, a to až na úrovni kongresu USA. Hlavním zájemcem o správu systému GPS bylo sice ministerstvo dopravy USA, nicméně zatím trvá zařazení tohoto systému pod ministerstvo obrany USA a v nejbližší době ani nelze očekávat změny [3].

Počet civilních uživatelů GPS lze dnes odhadnout na desítky milionů. Důvody tohoto nevšedního zájmu jsou především:

- relativně vysoká polohová přesnost, od desítek metrů až po milimetry
- schopnost určovat i rychlost a čas s přesností odpovídající přesnosti polohové
- dostupnost signálu kdekoli na zemi: na povrchu, na moři, ve vzduchu i v blízkém kosmickém prostoru
- standardní polohová služba systému GPS je civilním uživatelům dostupná bez omezení, bez jakýchkoli poplatků a její nejběžnější využívání je možné i při použití relativně levného zařízení
- je to systém pracující za každého počasí 24 hodin denně
- polohu je možné určovat v trojrozměrném prostoru

Globální polohový systém byl navržen tak, aby umožňoval všem odpovídajícím způsobem vybaveným uživatelům vysoce přesné určování třírozměrné polohy i rychlosti pohybu a dále získávání přesného časového signálu. Jedná se o klasický, pasivní dálkoměrný systém. Vlastnost pasivity je především ve vojenském prostředí výhodná z toho důvodu, že odpadá možnost nežádoucího zaměření přístroje protivníkem.

## 3.1 Historie

Historie družicové navigace sahá do počátku šedesátých let, kdy vojenské námořnictvo USA začalo rozvíjet projekt Transit. O něco později se o družicovou navigaci začalo zajímat i letectvo USA. Obě vojenské složky postupovaly ve vývoji těchto systémů odděleně, až teprve začátkem 70. let vydalo ministerstvo obrany Spojených států amerických memorandum, kterým podřídilo další vývoj družicových navigačních systémů vzdušným silám. Původně samostatné projekty obou vojenských složek byly sloučeny do jednoho programu označeného názvem NAVSTAR - GPS. V prosinci 1973 mohly být zahájeny práce na tomto systému [4].

### **Práce probíhaly v několika etapách:**

První etapa probíhala v letech 1973 - 1979 a byla zaměřena na ověření základních principů činnosti systému GPS. Nejprve byly prováděny pozemní testy zaměřené na ověření možností třírozměrné navigace v reálném čase. Poté se pokusy přenesly do kosmického prostoru. První družice pro ověření navigační technologie byly realizovány jako rozšíření programu Timotion. První družice byla vypuštěna 14. července 1974 a poprvé nesla na palubě atomové hodiny. Druhá a poslední družice této skupiny již na své palubě měla některé komponenty budoucích družic GPS: první césiové hodiny, generátor dálkoměrného kódu a první kosmický GPS počítač. V průběhu roku 1978 byly vypuštěny čtyři vývojové navigační družice Blok I, které byly na oběžných drahách rozmístěny tak, aby po omezenou dobu umožňovaly plnohodnotnou třírozměrnou navigaci. Družice Bloku I byly původně objednány jen čtyři, ale nakonec jich bylo ve vesmíru umístěno jedenáct. Projektovaná životnost družic byla jen tři roky, ale některé z nich pracovaly ještě i po deseti letech. Výhodou těchto družic bylo, že jejich signály byly v plném rozsahu přístupné komukoli.

Druhá etapa proběhla v letech 1979 - 1985. V tomto období byla budována řídicí střediska, v roce 1980 byl zahájen vývoj družic Bloku II a také ověřovací testy přijímačů GPS.

Třetí etapa probíhala od roku 1985 do 17. července 1995. V této době byl uzavřen kontrakt na výrobu 29 družic bloku II. Tyto družice nejprve doplňovaly a později i nahrazovaly družice Bloku I. Výkonnost systému se postupně zvyšovala, až bylo počátkem roku 1993 dosaženo stavu, kdy bylo možné provádět třírozměrnou navigaci kdekoli na Zemi po 24 hodin denně. Další použité družice se vyznačují zdokonalením a jsou schopné pracovat až 180 dní bez komunikace s řídicím segmentem, navíc jsou schopné mezi sebou komunikovat a určovat svoji vzájemnou vzdálenost. Díky tomu je možné snadněji detekovat anomální stavy družic a signalizovat je uživatelům bez zásahu řídicího segmentu.

Čtvrtá etapa probíhá od 17. července 1995 do dnes. V podstatě se jedná o období rutinního provozu a využívání systému GPS. V tomto období jsou budovány další doplňkové služby systému GPS, jako jsou systémy pro šíření diferenciálních korekcí, rozvíjejí se diskuse o možném rozšíření systému tak, aby bylo možné zajistit jeho integritu pro potřeby civilního letectví, diskutuje se o možném rozšíření vysílacích signálů na družicích následujícího Bloku IIF.

## 3.2 Princip činnosti

**GPS** (Global Positioning System) je projekt, který umožňuje komukoli na povrchu planety Země zjistit své zeměpisné souřadnice [5]. Ke své funkci využívá několika specializovaných družic, které ze svých oběžných drah vysílají směrem k Zemi signály v podobě elektromagnetických vln. Družice

jsou seřizeny tak, že všechny vyšlou signál v přesně definovaný okamžik. Poloha přijímače umístěného na Zemi je vypočtena na základě toho, s jakým zpožděním přijme signál z jednotlivých družic. V okamžiku vyslání signálu není známo, kdy byl vyslán z příslušné družice. Známý jsou pouze časové rozdíly. Tato koncepce je často označována zkratkou **TDOA** (Time Difference of Arrival).

Přijímačem jsou zaznamenány signály ze dvou zdrojů s časovým rozdílem  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Rychlost šíření signálu je známa, a tak je možné snadno vypočítat pozici přijímače vzhledem k vysílačům za předpokladu, že vysílače i přijímač se nacházejí v přímce. Složitější situace nastává, pokud se přijímač může nacházet kdekoli v rovině. V takovém případě již nelze jednoznačně určit pozici. Jediné, co je možné s jistotou tvrdit je to, že je přijímač umístěn v kterémkoli bodě hyperboly. Právě hyperbola má tu vlastnost, že všechny body na ní ležící mají stejný rozdíl vzdáleností od obou ohnisek hyperboly, ve kterých se nacházejí vysílače.

Pak tedy ke stanovení polohy v rovině je potřeba ještě jeden vysílač. Jsou-li vysílače tři, pak jsou získány tři časové rozdíly ( $t_2 - t_1$ ,  $t_3 - t_2$ ,  $t_3 - t_1$ ) z nichž pouze dva jsou nezávislé, tedy z libovolných dvou lze vypočítat zbývající třetí. Dva časové rozdíly určují dvě hyperboly a je známo, že vysílač se nachází současně na obou hyperbolách. Průsečík těchto hyperbol tedy jednoznačně určuje polohu přijímače.

Analogicky pro určení polohy v trojrozměrném prostoru je potřeba čtyř vysílačů. Z časového rozdílu mezi dvěma signály je možné stanovit, že přijímač se nachází někde na povrchu rotačního hyperboloidu. Jsou-li tedy k dispozici čtyři vysílače, pak je k dispozici šest časových rozdílů ( $t_2 - t_1$ ,  $t_3 - t_2$ ,  $t_4 - t_3$ ,  $t_3 - t_1$ ,  $t_4 - t_2$ ,  $t_4 - t_1$ ), z nichž pouze tři jsou nezávislé a zbývající lze vypočítat. Je tedy možné zkonstruovat šest rotačních hyperboloidů protínajících se v jednom bodě v prostoru. Postačí však libovolné tři. Nejdůležitější závěr plynoucí z celého rozboru je ten, že pro přesné určení polohy v trojrozměrném prostoru jsou potřebné čtyři družice. Díky nim lze stanovit všechny tři souřadnice bodu v prostoru, tedy zeměpisnou délku, zeměpisnou šířku a nadmořskou výšku.

Dosud byl uvažován pouze počet družic, ale je též nutno vzít v úvahu i jejich rozmístění vzhledem k poloze přijímače. Kdyby byly všechny čtyři družice umístěny v jednom bodě, jsou k určení polohy zcela bezcenné. Pokud by spolu s přijímačem tvořily přímku, je možné určit pouze jednu souřadnici. Jestliže budou ležet v jedné rovině, lze vypočítat pouze dvě souřadnice. Družice a přijímač se tedy nikdy nesmí nacházet v jedné rovině. Na první pohled by se zdálo, že tato podmínka není příliš svazující a je téměř vyloučeno, aby se vše nacházelo přesně v rovině. Reálná situace je však komplikovanější. Čím plošší je uspořádání, tím větší chyba nastává při určování polohy. Měření časových rozdílů je totiž vždy zatíženo chybami, které se promítnou do celkové chyby výsledku v závislosti na tom, jaké je rozestavení družic. Úhel družice-přijímač-družice by měl být co největší. Byl zaveden koeficient označovaný PDOP (Position Dilution Of Precision), který reprezentuje rozestavení družic. Čím lépe jsou družice rozmístěny vzhledem k uživateli, tím je tento koeficient vyšší.

### 3.3 Prvky GPS systému

GPS systém se skládá z několika základních částí. Kosmický a řídicí segment zajišťuje bezproblémový chod družic a uživatelská část slouží uživatelům ke zjišťování polohy. Každý segment je řízen jiným způsobem a platí pro něj jiné standardy.

### 3.3.1 Kosmický segment

Kosmický segment byl projektován původně na 24 nyní až 32 družic, které jsou rovnoměrně rozloženy v šesti oběžných rovinách. Oběžné roviny jsou centrické vzhledem k Zemi. Roviny mají přibližně 55° sklon k rovníku a jsou vůči sobě posunuty o 60° podél rovníku (posunutí rektascenze výstupních uzlů).

Družice obíhají ve výšce 20 200 kilometrů (11 000 námořních mil), každá družice oběhne svou dráhu dvakrát za hvězdný (siderický) den, tedy přeletí nad stejným místem na Zemi jednou za den (oběžná doba je rovna 11h a 58 min, což znamená, že pozorovatel na Zemi uvidí družici vycházet vždy o 4 minuty dříve). Oběžné dráhy jsou navrženy tak, že je téměř vždy viditelných alespoň šest družic z kteréhokoli místa na Zemi [3].

K lednu 2007 bylo v GPS konstelaci 29 aktivně vysílajících GPS družic. Doplnkové družice vylepšují přesnost výpočtů GPS přijímačů, protože poskytují nadbytečná měření. Díky nadbytečnému počtu družic se rozestavení celé konstelace změnilo na nesouměrné, nicméně pokud několik družic selže, systém zůstává plně funkční (týká se především spolehlivosti a dostupnosti). Družice váží asi 1,8 tuny a na střední oběžné dráze (MEO, Medium Earth Orbit) se pohybuje rychlostí 3,8 km/s.

#### **Klíčové části družic NAVSTAR jsou:**

- 3 až 4 velmi přesné atomové hodiny s rubidiovým nebo s cesiovým oscilátorem
- 12 antén RHCP pro vysílání radiových kódů v pásmu L (1000-2000 MHz)
- antény pro komunikaci s pozemními kontrolními stanicemi v pásmu S (2204,4 MHz)
- antény pro vzájemnou komunikaci družic v pásmu UHF
- optické, rentgenové a pulzní-elektromagnetické detektory senzory pro detekci startů balistických raket a jaderných výbuchů
- solární panely a baterie jako zdroj energie

V Česku je nejčtenější viditelnost 8 družic (medián), minimum pak 6, maximum 12 družic, při elevační masce 10° v roce 2008.

Družice vysílají v pásmech, které jsou zvoleny záměrně tak, aby byly minimálně ovlivněny meteorologickými vlivy. Přiděleno je několik frekvencí a každé frekvenci odpovídá jeden vysílací kanál.

Družice jsou několikrát do roka, obvykle plánovaně, odstaveny pro údržbu atomových hodin a korekci dráhy družice. Údržba trvá přibližně 12-24 hodin. Průměrná životnost družice je asi 10 let, obměna kosmického segmentu trvá přibližně 20 let.

#### **Pro popis stavu kosmického segmentu jsou definovány dva stavy implementace:**

- **plná operační schopnost** (FOC, Full Operational Capability) - označení stavu, kdy je nejméně 24 družic plně funkčních, podporující novou technologii. Poprvé byl vyhlášen 17. července 1995 po vypuštění a zprovoznění 24 družic Bloku II a IIA.

- **částečná operační schopnost** (IOC, Initial Operational Capability) - označení stavu, kdy je nejméně 18 družic plně funkčních, podporující novou technologii. Poprvé byl vyhlášen 8. prosince 1993 po vypuštění a zprovoznění 18 družic Bloku I, II a IIA.

### 3.3.2 Řídící segment

Dráhy letu GPS družic jsou sledovány monitorovacími stanicemi v těchto lokalitách: Havajské ostrovy, Kwajalein, Ascension, Diego Garcia a Colorado Springs, Colorado. Sledovací data (tracking information) jsou posílány do hlavní řídicí stanice, která se nachází na letecké základně Schriever v Colorado Springs odkud jsou pravidelně posílány každé GPS družici aktualizace navigačních dat (využívá přitom pozemní antény, které jsou součástí zařízení stanic Ascension, Diego Garcia, Kwajalein a Colorado Springs). Tyto aktualizace synchronizují družicové atomové hodiny a upravují družicové efemeridy, které jsou posléze vysílané družicí [3].

Segment se skládá z několika částí:

- **velitelství** - Navstar na letecké základně Los Angeles v Californii v USA.
- **řídicí středisko** (MSC, Master Control Station), na letecké základně v Colorado Spring, záložní řídicí středisko (BMCS, Backup Master Control Station) umístěné v Gaithersburg.
- **3 povelové stanice** (Ground Antenna), které jsou umístěny na základnách USAF: Kwajalein, Diego Garcia, Ascension Island případně i Cape Canaveral.
- **18 monitorovacích stanic** (Monitor Stations), které jsou umístěny na základnách USAF.

Výsledkem monitoringu je navigační zpráva každé družice a její platnost je řádově několik hodin:

- data pro model ionosférické refrakce
- predikce dráhy družice - efemerid
- korekce atomových hodin
- přibližné pozice ostatních družic a jejich „zdravotní“ stav

Řídící a kontrolní segment komunikuje s uživateli také prostřednictvím zpráv GPS NANU, kde zveřejňuje plánované odstávky družic, jejich stažení a uvedení do provozu nebo i zpětně informace o poškozené družici.

Pokud by došlo k zničení pozemních vojenských stanic řídicího a kontrolního segmentu, přechází družice do režimu AUTONAV (Autonomous Navigation Mode), ve kterém jsou schopny dále pracovat až 6 měsíců. V tomto režimu spolu družice komunikují a porovnávají vzájemně mezi sebou své efemeridy a stav palubních hodin.

### 3.3.3 Uživatelský segment

GPS přijímače uživatelů tvoří uživatelský segment GPS. Uživatelé pomocí GPS přijímače přijímají signály z jednotlivých družic, které jsou v danou chvíli nad obzorem. Na základě přijatých dat (časových značek z jednotlivých družic a znalosti jejich polohy) a předem definovaných parametrů, přijímač vypočítá polohu antény, nadmořskou výšku, přesný datum a čas. Komunikace probíhá pouze od družic k uživateli, GPS přijímač je tedy pasivní [3].

#### Rozdělení přijímačů podle přijímaných pásem:

- jednofrekvenční
- dvoufrekvenční
- vícefrekvenční (připravují se pro pásmo L5)

#### Rozdělení přijímačů podle kanálů:

- jednokanálové (používané v raných fázích projektu GPS)
- vícekanálové

#### Rozdělení přijímačů podle principu výpočtů:

- kódová
- fázová a kódová

Běžně dostupné přijímače k amatérskému (tj. negeodetickému a nevojenskému) využití se vyrábí jako jednofrekvenční, vícekanálové a kódové. Jednoduchý přijímač signálu GPS se skládá z:

- antény
- předzesilovače
- procesoru
- časové základny (často křemíkový krystal o přesnosti  $<10^{-6}$ s)
- komunikačního rozhraní
- mohou obsahovat zařízení pro příjem diferenciálních korekcí.

Uživatelé využívající systém GPS můžeme rozdělit do dvou skupin:

- **autorizovaní uživatelé** (vojenský sektor USA a vybrané spojenecké armády) využívající službu Precise Positioning Service (PPS) mající k dispozici dekódovací klíče k P(Y) kódu na frekvencích L1 (1575,42 Mhz) a L2 (1227.6 MHz). Tito uživatelé mají zaručenou vyšší přesnost systému.
- **ostatní uživatelé** (především civilní sektor) mohou využívat Standard Positioning Service (SPS) a mají k dispozici C/A kód na frekvencích L1.

## 3.4 Diferenciální GPS

Jedním ze způsobů, kterým lze zpřesnit výsledky měření je použití diferenciálního GPS. Pro jeho použití je nutné mít k dispozici alespoň jeden přijímač GPS signálu o známých souřadnicích, tzv. referenční stanici. Tato referenční stanice vyhodnocuje odchylky měření v systému GPS od skutečného stavu své polohy a vypočítává korekce. Permanentní referenční stanice (např. CZEPOS, EUREF-IP) mají vlastní polohu vypočtenou dlouhodobým měřením. Mobilní referenční stanice určí polohu pomocí jiného zdroje [6].

Při vyšším počtu propojených referenčních stanic s malými vzdálenostmi od sebe (desítky kilometrů), je možné připravit síťové řešení výpočtu korekcí a interpolovat výsledky na virtuální referenční stanici v blízkosti uživatele. Moderní referenční stanice je navíc schopna poskytovat korekce k více družicovým polohovým systémům zároveň (např. GLONASS a GPS).

Zjištěné korekce jsou odesílány uživatelům typicky casterem NTRIP a protokolem RTCM. Přenos se děje za pomoci sítě internet, datového přenosu v mobilních sítích, dlouhověkého vysílání případně signálu RDS. Pokud jsou uživatelé vybaveni přijímačem přizpůsobeným k příjmu korekcí DGPS a jsou dostatečně blízko referenční stanici, mohou svá měření zpřesnit.

Pokud uživatel nemůže přijímat korekce on-line, je možné u dražších přijímačů ukládat data do speciálního formátu (např. RINEX) a provést tzv. postprocesní korekce až ve chvíli, kdy budou dostupná archivní data stejného formátu od referenční stanice.

Diference jsou rozlišovány podle způsobu výpočtu

- jednoduché diference
- dvojité diference
- trojité diference

Snadno dostupnou službou DGPS je SBAS, jehož evropskou aplikací je ENGOS. Pro geodetická měření byla v České Republice zbudována síť permanentních stanic CZEPOS, která využívá síťového řešení 27 referenčních stanic, jejichž provozovatelem je ČÚZK. Přesnost měření se sítí CZEPOS je u kódových měření 0.25 m, u fázových měření 0.015 m. Existují i soukromé referenční sítě jako např. TopNET, by/S@T a vědecké referenční sítě GeoNAS(ČAS) a VESOG (VÚGTK).

## 3.5 Přesnost a použitelnost

Přesnost výpočtu polohy přijímače podléhá vlivům, které vnáší do výpočtu chybu, která má charakter náhodné veličiny. Velikost chyby popisujeme statistickým parametrem efektivní hodnoty chyby (RMS, Root Mean Square), což je odmocnina z průměru kvadrátu chyby [2].

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{chyba^2}{n}} \quad (1)$$

Přesnost výpočtu polohy kódového měření ovlivňují zejména:

Tabulka 2: Dílčí parametry RMS

| Příčina                   | Velikost RMS při GDOP =1 |
|---------------------------|--------------------------|
| Efemeridy družic          | ± 2,1m                   |
| Družicové hodiny          | ± 2,1m                   |
| Ionosférická refrakce     | ± 4,0m                   |
| Troposférické refrakce    | ± 0,7m                   |
| Vícecestné šíření signálu | ± 1,4m                   |
| Přijímač                  | ± 0,5m                   |

### 3.5.1 Efemeridy

Efemeridy jsou predikované polohy družic na oběžných drahách. Družice se pohybují po téměř kruhových, mírně elipsovitých drahách velkou rychlostí a ve velké vzdálenosti od Země, tedy jsou jejich dráhy stabilní a dobře matematicky popsatelné. Přesto se vlivem kolísání tíhových sil Země, Slunce, Měsíce a sluneční jaderné aktivity jejich dráha mírně mění. Předpoklad vývoje trajektorie je popsán v navigační zprávě.

### 3.5.2 Družicové hodiny a relativistické efekty

Družice nesou atomové hodiny s rubidiovým nebo cesiovým oscilátorem. Jsou velmi stabilní, ale pro výpočet je třeba přesných a synchronních hodin na všech družicích i na Zemi.

Podle Einsteinova principu relativity lze pro družice NAVSTAR GPS na orbitu, vztažené k Zemi jako inerciálnímu referenčnímu systému, očekávat efekty ovlivňující palubní hodiny:

- pohybová rychlost družice (Speciální teorie relativity): hodiny se zpomalují o  $-5 \cdot 10^{-9} \%$  vůči pozemským
- rozdílné gravitační potenciály (Obecná teorie relativity) ve značné vzdálenosti nad Zemí, protože intenzita gravitačního pole klesá s druhou mocninou vzdálenosti (pro orbit družic asi 16-krát): hodiny se zrychlují  $50 \cdot 10^{-9} \%$

Když oba efekty zkombinujeme je výsledkem  $45,5 \cdot 10^{-9} \%$  oproti pozemským hodinám  $\pm 0 \%$ . Řešení tohoto efektu je hardwarové nastavení základní frekvence na 10,22999999543 MHz místo očekávaných a pozemských 10,23000000000 MHz. Další variabilní korekce je v navigační zprávě o hodnotách řádově v desítkách nanosekund ( $10^{-9}$ s), protože výška orbitu družice je proměnná, rozložení gravitace není konstantní a samotné hodiny vykazují odchylku.

### 3.5.3 Ionosférická a troposférická refrakce

Rádiový signál vysílaný z družice se ve vzdálenosti 500 – 20200 km od povrchu šíří téměř vakuem. Ionosféra, která se nachází v rozmezí 50-500 km nad povrchem země, obsahuje množství volných elektronů a iontů, které způsobují refrakci (lom) radiového signálu, tedy jeho delší dráhu a zpoždění. Stav ionosféry ovlivňuje aktuální i cyklická (perioda 11 let) aktivita Slunce, globální meteorologické vlivy, roční období a fáze dne. V přijímačích je implementován základní model, který tyto změny zohledňuje a navigační zpráva obsahuje vstupní parametry pro jeho výpočet. S výhodou lze modelovat pomocí kulových funkcí, klíčovou hodnotou v modelu je pak TEC (Total Electronic Content). Analýzou signálu na různých kmitočtech (L1, L2) lze tuto chybu eliminovat, protože změna rychlosti radiového signálu ionosférou je frekvenčně závislá.

Obdobný vliv má troposféra, která se nachází od 0-15km nad povrchem Země. Její stav ovlivňují především lokální meteorologické vlivy jako je teplota, tlak a vlhkost. Její možnost predikce je pro globální systém minimální a eliminuje se diferenčními systémy nebo lokálními modely.

### 3.5.4 Přijímač a vícecestné šíření signálu

Konstrukce přijímače dříve výrazně ovlivňovala měření díky malému počtu kanálů, snížené přesnosti u 8-bitových procesorů nebo malé citlivosti na vstupu. Dnes má vliv hlavně metodika výpočtu, kdy jsou do algoritmu vnášeny předpoklady podle způsobu využití přijímače (doprava, letectví, turistika) a vlastností antény, její konstrukci a umístění.

Pokud je anténa přijímače částečně zastíněná nebo jsou v blízkosti odrazivé materiály existuje možnost, že přijímá také signály odražené a tedy opožděné. Velikost této chyby je závislá na vlastnostech okolí a míře zastínění. V profesionálních přístrojích ji lze eliminovat vhodně polarizovanou anténou, protože signál původně polarizovaný pravotočivě po odrazu mění polarizaci na levotočivou. Další technikou je nastavení elevační masky na oblast, odkud není možný příjem signálu, nebo filtrace Narrow correlator spacing.

### 3.5.5 Geometrické rozmístění družic

Chybu měření výrazně ovlivňuje rozmístění družic na hemisféře a obecně se nazývá zkratkou DOP (Dilution of Precision, rozptyl přesnosti). Souhrnný GDOP z intervalu 1-50 nabývá v našich zeměpisných šířkách a nadmořských výškách hodnot 1-4 a je zastoupen dílčími DOP:

- Horizontální - HDOP
- Vertikální - VDOP
- Prostorový - PDOP
- Časový - TDOP
- Geometrický – GDOP

Kde PDOP a GDOP se vypočte podle následujících vzorců:

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \quad (2)$$

$$GDOP = \sqrt{TDOP^2 + HDOP^2 + VDOP^2} \quad (3)$$

Zatímco hodnota HDOP se mění se zeměpisnou polohou jen málo, mění se hodnota VDOP se zeměpisnou šířkou. V zeměpisné šířce  $\pm 56^\circ$  dosahuje svého minima a s dalším zvyšováním zeměpisné šířky pak výrazně roste. Tento nárůst chyby ve vyšších zeměpisných šířkách je způsoben tím, že po překročení zeměpisné šířky, která je rovna inklinaci dráhy, již družice nedosahují nadhlavníku a kulminují ve stále nižších elevacích. Třidimenzionální chyba určení polohy prakticky sleduje průběh dominantní chyby výšky.

V České Republice lze očekávat průměrné hodnoty PDOP = 1,9, přičemž minimální PDOP = 1,35 a maximální PDOP = 3,6.

### 3.5.6 Selektivní dostupnost (Selective Availability)

Od 25. března 1990 byla do C/A kódu radiového signálu zanášena umělá chyba. Toto opatření pod názvem Selective Availability (SA) mělo zabránit zneužití např. možnosti navádět balistické rakety, pomocí nepřesných efemerid a časových značek. SA způsobovalo chybu 45 m horizontálně (95% RMS). Tuto chybu však bylo možno výrazně potlačit diferenčním měřením nebo dlouhodobým statickým měřením.

Protože USA vyvinuly systém, jak lokálně rušit signál GPS, bylo SA 1. května 2000 zrušeno a přesnost kódového měření polohy se tak zvýšila na původní do rozsahu desítku metrů.

### 3.5.7 Sagnacovo zakřivení

Při sledování družic je nutné také kompenzovat Sagnacův efekt. Časový referenční rámec je definován pro inerciální systém ECEF (Earth-centered, Earth-fixed), ale ve skutečnosti se jedná o rotační systém WGS 84 (obvodová rychlost Země na rovníku 0,465 km/s). Přepočtení se provádí Lorentzovou transformací a výsledné korekce mají kladné hodnoty pro družice na východní a záporné hodnoty na západní nebeské hemisféře a pohybují se ve stovkách nanosekund (asi desítky metrů v pozici).

## 3.6 Standard NMEA

NMEA - National Marine Electronics Association (Národní Asociace pro Námořní Elektroniku) vytvořila standard NMEA-0183, který definuje rozhraní mezi elektronickými zařízeními používanými pro lodní dopravu. Tento standard umožňuje výměnu informací mezi počítačem a různými zařízeními, v našem případě GPS přijímačem [7].

Pomocí NMEA-0183 formátu spolu komunikují vždy jeden mluvčí (talker) a jeden nebo více posluchačů (listeners). Veškerá data jsou posílána ve formě vět (sentences). Jsou dovoleny pouze tisknutelné ASCII znaky a znaky konce řádku, tedy <CR> a <LF> (0x0d, 0x0a hexadecimálně). Každá věta začíná znakem \$ (dolar) a končí sekvencí <CR><LF>. Existují tři základní druhy vět:

- věty ze strany mluvčího (talker sentences)
- proprietární věty (proprietary sentences)

- dotazovací věty (query sentences)

## Věty ze strany mluvčího

Obecný formát vět ze strany mluvčího je:

```
$ttsss,d1,d2,....<CR><LF>
```

První dvě písmena, která následují po znaku dolar, jsou označena `tt` a představují identifikátor mluvčího (talker identifier). Další tři písmena (`sss`) jsou identifikátor věty (sentence identifier). Následují datové položky oddělené čárkami (znak ","). Po nich následuje nepovinný kontrolní součet. Věta je ukončena znaky `<CR><LF>`. Význam jednotlivých datových položek je jednoznačně definován pro konkrétní typ věty (ten je určen identifikátorem `sss`). Jestliže určitá datová položka není k dispozici, zůstane datové pole prázdné, ale čárky oddělující datová pole zůstávají (bez mezery). Kontrolní součet je uvozen znakem hvězdička ("\*") a za ní jsou dvě hexadecimální číslice představující logickou operaci XOR (exclusive OR) ze všech znaků mezi "\$" a "\*". Samotný dolar a hvězdička se do kontrolního součtu nezapočítávají. Každá věta může obsahovat nejvýše 80 znaků. Věta včetně znaků "\$" a `<CR><LF>` může mít délku maximálně 83 znaků.

## Proprietární věty

Umožňují výrobcům nadefinovat vlastní větu. Tyto věty začínají sekvencí "\$P", pak následuje třípísmenný identifikátor výrobce, a dále následují jednotlivé datové položky v souladu s přáním výrobce. Obecný formát věty musí být zachován.

## Dotazovací věty

Představují způsob, kterým může posluchač zažádat mluvčího o zaslání konkrétní věty. Obecný formát je:

```
$t11Q,sss<CR><LF>
```

První dva znaky (`tt`) za znakem dolar jsou identifikátorem toho, kdo podává žádost. Následující dva znaky (`11`) označují dotazovaného - tedy toho, komu je žádost posílána. Pátým znakem je vždy písmeno "Q", které označuje, že se jedná o dotazovací typ věty. Následuje třípísmenná datová položka (`sss`) určující, o jaký typ věty se žádá. Příkladem dotazovací věty může být následující sekvence:

```
$CCGPQ,GGA<CR><LF>
```

V této větě písmena `CC` označují počítač, který žádá přístroj `GP` (tedy GPS přijímač), aby zasílal věty typu `GGA`. Po této dotazovací větě by měl GPS přijímač zasílat každou sekundu větu typu `GGA`, dokud nedostane povel k zaslání jiného typu věty.

Dvoupísmenných identifikátorů existuje mnoho, nicméně v této chvíli je nejdůležitější, že pro GPS přijímače se používá identifikátor GP.

Existuje velké množství různých vět, ale většina přístrojů je schopna zpracovat pouze základní čtyři, mezi něž patří RMC (základní informace o pozici), GGA (rozšířené informace o pozici včetně nadmořské výšky, odhadované chyby, či počtu viditelných satelitů), GSA a GSV (informace o satelitech).

### 3.6.1 RMC věty

RMC je zkratka pro Recommended minimum specific GPS/Transit data a je to tedy jakési doporučené minimum, které by měla poskytovat většina GPS zařízení. Příklad věty může být např.:

```
$GPRMC,170138.615,A,4912.2525,N,01635.0378,E,0.04,16.43,280705,,*32
```

Tabulka 3: Dílčí parametry RMC věty

|    | formát     | příklad    | komentář   |
|----|------------|------------|--|
| 1  | hhmmss.sss | 170138.615 | Čas: 17:01:38.615 (UTC)                          |
| 2  | c          | A          | Status (A = active, V = void – neplatná pozice)  |
| 3  | dmm.mmmm   | 4912.2525  | Zeměpisná šířka: 49°12.2525'                     |
| 4  | c          | N          | Indikátor sever/jih (N=sever, S=jih)             |
| 5  | dmm.mmmm   | 01635.0378 | Zeměpisná délka: 16°35.0378'                     |
| 6  | c          | E          | Indikátor východ/západ (E=východ, W=západ)       |
| 7  | d.d        | 0.04       | Vodorovná rychlost (Speed Over Ground, v uzlech) |
| 8  | d.d        | 16.43      | Kurz pohybu ve stupních                          |
| 9  | ddmmyy     | 280705     | Datum: 28.7.2005                                 |
| 10 | d.d        | N.A.       | Magnetická deklinace ve stupních                 |
| 11 | c          | N.A.       | Směr magnetické deklinace (E=východ, W=západ)    |
| 12 | *xx        | 32         | Kontrolní součet                                 |

### 3.6.2 GGA věty

Druhá nejpoužívanější GPS věta má zkratku GGA, Global Positioning System Fix Data. Opět bude použit ilustrační příklad:

```
$GPGGA,170139.615,4912.2526,N,01635.0378,E,1,07,1.0,357.5,M,43.5,M,0.0,0000*7D
```

Tabulka 4: Dílčí parametry GGA věty

|    | <b>formát</b> | <b>příklad</b> | <b>komentář</b>  |
|----|---------------|----------------|--|
| 1  | hhmmss.sss    | 170139.615     | Čas: 17:01:38.615 (UTC)  |
| 2  | ddmm.mmmm     | 4912.2526      | Zeměpisná šířka: 49°12.2526'   |
| 3  | c             | N              | Indikátor sever/jih (N=sever, S=jih)   |
| 4  | dddmm.mmmm    | 01635.0378     | Zeměpisná délka: 16°35.0378'   |
| 5  | c             | E              | Indikátor východ/západ (E=východ, W=západ)   |
| 6  | d             | 1              | Indikátor kvality:<br>0 - nebylo možno určit pozici<br>1 - pozice úspěšně určena (GPS)<br>2 - pozice úspěšně určena (diferenční GPS)                       |
| 7  | dd            | 07             | Počet viditelných satelitů 00 - 12   |
| 8  | d.d           | 1.0            | relativní chyba v horizontálním směru<br>HDOP (Horizontal Dilution of precision)   |
| 9  | d.d           | 357.5          | nadmořská výška v metrech  |
| 10 | c             | M              | Jednotka pro předchozí údaj (č.9) (M=metr)   |
| 11 | d.d           | 43.5           | Geoidal separation, rozdíl mezi WGS-84 zemským elipsoidem a střední úrovní moře (geoid). Znaménko mínus znamená, že střední úroveň země je pod elipsoidem. |
| 12 | c             | M              | Jednotka vzdálenosti pro předchozí položku (č.11) (M=metr)   |
| 13 | d.d           | 0.0            | Stáří poslední aktualizace DGPS. Údaj je uváděn v sekundách. Jestliže údaj chybí, nepoužívá se DGPS.   |
| 14 | dddd          | 0000           | Identifikační číslo referenční stanice pro DGPS (0000 — 1023)  |
| 15 | *xx           | 7D             | Kontrolní součet   |

### 3.6.3 GSA věty

Seznam viditelných satelitů je možné získat z věty GSA. Příklad takové věty:

\$GPGSA,A,3,29,26,22,09,07,05,04,,,,,,,,,1.7,1.0,1.4\*30

Tabulka 5: Dílčí parametry GSA věty

|     | <b>formát</b> | <b>příklad</b> | <b>komentář</b>  |
|-----|---------------|----------------|--|
| 1   | c             | A              | Přepínání mezi N-rozměrnými módy (A=automatické, M=manuální) |
| 2   | d             | 3              | Počet dimenzí N (1 = chyba, 2 = 2D, 3 = 3D)                  |
| 3   | dd            | 29             | ID prvního satelitu použitelného pro výpočet                 |
| ... | dd            | ..             | ID dalších satelitů použitelných pro výpočet                 |
| 14  | dd            | N.A.           | ID dvanáctého satelitu použitelného pro výpočet              |
| 15  | d.d           | 1.7            | PDOP (Position Dilution Of Precision) v metrech              |
| 16  | d.d           | 1.0            | HDOP (Horizontal Dilution Of Precision) v metrech            |

|    |       |     |   |
|----|-------|-----|---|
| 17 | d . d | 1.4 | VDOP (Vertical Dilution Of Precision) v metrech |
| 18 | *xx   | 30  | Kontrolní součet                                |

### 3.6.4 GSV věty

Množství údajů závisí na počtu viditelných družic. Jedna věta může obsahovat nejvýše 80 znaků, což stačí pouze k uložení dat týkajících se nejvýše čtyř družic. Informace proto bývá rozdělena do několika dílčích vět. Například:

\$GPGSV,3,1,11,09,84,297,41,05,48,256,45,07,38,059,41,26,22,178,41\*74

Tabulka 6: Dílčí parametry GSV věty

|     | formát | příklad | komentář   |
|-----|--------|---------|--|
| 1   | d      | 3       | Celkový počet vět (čísly se od 1)                                    |
| 2   | d      | 1       | Číslo aktuální věty (taktéž se čísluje od 1)                         |
| 3   | dd     | 11      | Počet viditelných družic   |
| 4   | dd     | 09      | Identifikační číslo družice  |
| 5   | dd     | 84      | Úhlová výška, kde se daná družice nachází                            |
| 6   | ddd    | 297     | Azimut, kde se daná družice nachází                                  |
| 7   | dd     | 41      | Odstup signálu od šumu (SNR - Signal to Noise Ratio).                |
| ... | ...    | ...     | Podle počtu viditelných družic mohou následovat další čtveřice údajů |
| n   | *xx    | 74      | Kontrolní součet   |

# Kapitola 4

## Algoritmy detekce kolizí

Antikolizní systém je celek, který má zabránit vzniku kolizí mezi objekty, nebo alespoň varovat před hrozící srážkou. Jestliže je známa pozice a směr pohybu všech objektů, které by se mohli na kolizi podílet, pak antikolizní systém musí na základě těchto znalostí vyvodit odpovídající důsledky, tedy v případě hrozícího nebezpečí doporučit změnu směru nebo rychlosti pohybu. V následující kapitole jsou řešeny základní metody detekce kolizí v trojrozměrném prostoru. Z daných metod jsou vybrány ty, jež svými vlastnostmi vyhovují modelu prostředí a nejsou výpočetně příliš náročné.

### 4.1 Model Prostředí

Nejpodstatnější ve fyzikálních modelech pracujících v reálném čase je zajistit realističnost fyzikálního modelu. S tím souvisí interakce jednotlivých objektů ve scéně, detekce kolizí a řešení těchto kolizí.

Existuje několik základních přístupů pro detekci kolizí ve scéně. Ty jsou použity především podle datového modelu prostředí, kde se objekt nachází.

#### 4.1.1 2D model okolí

První z nich je model, kde je okolí reprezentováno pouze jako dvojrozměrný obraz, například jako výstup z kamery nebo mapa. Scénu je pak například možno rozdělit na geometrická primitiva jako je trojúhelník a z nich poté zrekonstruovat polygonální trojrozměrný model původní scény. K takovému zpracování je ovšem potřeba mít k dispozici dva obrazy stejného okolí snímané z různých pozorovacích bodů. V neposlední řadě je k sestavení polygonálního modelu v reálném čase potřeba velmi výkonné zařízení. Pokud je k dispozici pouze mapa, kudy se může objekt pohybovat, není možné řešit kolize v trojrozměrném prostoru ale pouze na ploše.

Alternativním přístupem k výpočtu původního polygonálního modelu pro potřeby výpočtu kolizí je pouhé sledování změn v obraze.

#### 4.1.2 3D model okolí

Prostředí v 3D modelu je většinou uloženo i reprezentováno některou možnou podobou polygonálního modelu. Možné je samozřejmě použít i jiné modely a přístupy. Společné zůstávají pouze požadavky na takový model:

- obecnost - popis co nejrozsáhlejší třídy objektů
- úplnost - úplně popisuje jakýkoli objekt
- jednoznačnost – lze vyhodnotit pouze jedním způsobem
- unikátnost – jednomu tělesu odpovídá jeden model
- přesnost – popis objektu
- regulérnost – nemožnost vytvořit nereálnou reprezentaci
- konzistence vůči vybraným operacím
- kompaktnost – malá paměťová náročnost
- možnost efektivního zpracování

Základní modely pro práci s 3D modelem:

- konstruktivní geometrie - CSG
- šablonování – pohyb po dráze
- dekompoziční modely
- implicitní plochy
- hraniční reprezentace

Všechny uvedené modely jsou v praxi používány, ale pro výpočet kolizí jsou vhodné pouze některé z nich.

Konstruktivní geometrie skládá objekty pomocí základních trojrozměrných primitiv za pomoci translací, rotací a booleovských operací. Takový model je přesný a je možné v něm stanovit kolize, ale pro práci s takovým modelem je potřeba velké množství paměti a výkonné zařízení.

Model založený na šablonách je pro výpočet kolizí nevhodný a pokud je potřeba řešit kolize, použije se jiný vhodnější model.

Dekompoziční modely rozkládají prostor na základní objemové jednotky. Běžně použité metody jsou zde například 3D pole, octree nebo subvoxely. V dekompozičním modelu je velmi snadné řešení kolizí, ale jedná se o paměťově velmi náročný model.

Implicitní plochy jsou potenciální pole elementárních částic. Tento model patří mezi výpočetně náročné.

Hraniční reprezentace je model, ve kterém jsou uloženy pouze hranice objektu. Většinou se používá drátový nebo polygonální model.

## 4.2 Metody výpočtu kolizí

Pro každý použitý model se počítají kolize jiným způsobem, což je převážně způsobeno různou reprezentací dat a znalostí okolí. Společné zůstávají pouze požadavky na správné určení kolize v prostoru.

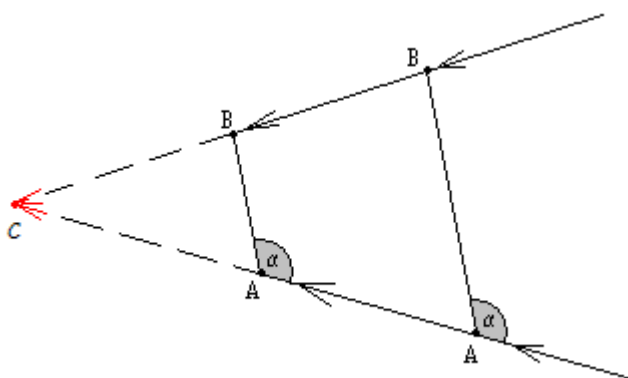
## 4.2.1 Kolize v 2D modelu

Pokud je možné dvojrozměrný obraz okolí převést na jakoukoli trojrozměrnou reprezentaci, pak je výpočet kolizí počítán v daném modelu.

Převod dvojrozměrného obrazu na trojrozměrný model je výkonově velice náročný. Alternativním přístupem k výpočtu původního polygonálního modelu pro potřeby výpočtu kolizí je sledování vektorů posunutí. Metoda však není schopna detekovat vznikající kolizi. Je možné určit pouze skutečnost, že nějaký objekt se pravděpodobně pohybuje po kolizní dráze.

Pohybující se objekt, který má k dispozici vždy pouze snímek okolí v určitou dobu, vyextrahuje z obrazu podezřelé entity. Většinou se jedná o barevně odlišné nebo výrazně světlejší případně tmavší oblasti snímku. Pro každou takovou entitu je uložena její poloha ve snímku. Jakmile je k dispozici následující obraz okolí, znova se z obrazu získají polohy podezřelých entit. Pokud se poloha některé entity nezměnila a tedy vektor posunutí je nulový, pak se pravděpodobně pohybuje po kolizní dráze.

Principem této metody je velikost změny úhlu, pod kterým je podezřelý objekt pozorován. Mějme tedy dva objekty A a B, které se pohybují na kolizní dráze. První z nich je objekt A, pozoruje druhý objekt B pod určitým úhlem vzhledem ke směru, kterým se pohybuje. Pokud se oba objekty posunou ve směru svého pohybu a objekt A bude pozorovat objekt B pod stejným úhlem, jako před provedením posunutí, pak pravděpodobně leží v kolizní dráze. Situaci popisuje obrázek 1.



obrázek 1. Objekty na kolizních drahách

Objekty A a B tvoří vrcholy trojúhelníka, u kterého se postupně zkracují velikosti jednotlivých stran, ale vrchol C jež je bodem kolize svou polohu nemění. Pokud se tedy nemění pozorovací úhel  $\alpha$ , je možné, že po určitém počtu posunutí obou objektů dojde ke kolizi.

Tato metoda je výpočetně mnohem méně náročná, ale má také své slabiny. Objekty se mohou pohybovat po drahách, na kterých ke kolizi dojde v nekonečnu, pohybují se tedy po rovnoběžných drahách. Dalším problémem je záměna pohybujících se objektů, kde byly objekty ohodnoceny jako podezřelé a byla uložena jejich pozice. V následujícím kroku se objekty v prostoru přesunou a jejich poloha v rámci obrazu je opět stanovena, ale objekty v rámci obrazu se vyskytují v bodě, kde se v minulém kroku vyskytoval jiný objekt. Poslední výraznou nevýhodou je možnost překrytí, tj. více entit je v rámci snímku za sebou a viditelný je pouze nejbližší. Většina těchto nevýhod je eliminovatelná přidáním dalšího snímáčího zařízení do jiného pozorovacího bodu a využití znalostí

z obou snímacích zařízení. Pokud ovšem jiný pohybující se objekt není na snímcích dobře patrný, systém nezaznamená jeho existenci a není schopen řešit kolize.

## 4.2.2 Kolize ve 3D modelu

Zde je situace složitější a to především díky množství použitelných modelů.

### Kolize v konstruktivní geometrii

Jak již bylo uvedeno, konstruktivní geometrie skládá složitější objekty ze základních trojrozměrných primitiv pomocí translací, rotací a booleovských operací. Pak kolizi rozumíme neprázdný průnik alespoň dvou různých objektů. Průnik je jednou z booleovských operací a není tedy nutné hledat speciální kolizní metodu. Ovšem výpočet průniku dvou těles vzniklých množinou booleovských operací nad základními trojrozměrnými objekty je výpočetně velmi náročné. Stejnou přesnost nabízí také model hraniční reprezentace za předpokladu, že hranice objektu jsou přesně popsány.

### Kolize v modelu šablon a implicitních ploch

Oba modely jsou pro výpočet kolizí nevhodné a v případě potřeby se povádí převod do jiného modelu.

### Kolize v dekompozičním modelu

Základní jednotkou při dekompozici je jistá nejmenší oblast, na kterou může být prostor dekomponován. Kolize je tedy situace, kdy určité oblasti obsahují více než jeden objekt. Výpočet kolize je velice jednoduchý, ale přesnost je dána velikostí nejmenší oblasti a výpočet je paměťově velmi náročný.

### Kolize v hraniční reprezentaci

Detekce kolizí v modelu hraniční reprezentace je velice široká oblast. Základní principy jsou použity v konstruktivní geometrii a počítačových hrách. Pokud je objekt přesně popsán, pak je vypočtená kolize přesná a není výpočetně příliš náročná. Principy by bylo možné rozdělit do dvou základních kategorií.

Jde o boundingSphere (překlad z angličtiny by znamenal obalová koule, ale běžně se tento pojem nepřekládá) což je obalové těleso, které uvnitř sebe obsahuje celý objekt. Pak jednoduchým testem na vzdálenost středů odhaluje možnost kolize. V případě, že obalové těleso není koule, ale krychle nebo kvádr se provádí jednoduchý test průniku.

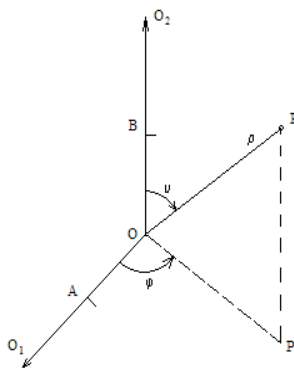
Jiná možnost jak řešit kolize je množinou principů jako je například triangle to triangle (kolize trojúhelníků) nebo triangle line (kolize trojúhelníku a přímky). Principiálně se zde používá parametrické srovnání pro odhalení kolizních bodů mezi jedním trojúhelníkem a rovinou druhého trojúhelníka nebo kolizní přímkou. Tak se rozhodne, které kolizní body leží uvnitř trojúhelníka a které ne. Obecně se vždy jedná o srovnávání parametrů obecných prostorových entit, ze kterých je objekt složen.

## 4.3 Předzpracování GPS dat

Při výpočtu kolizí je velmi důležité znát polohu objektu, vůči kterému budou hledány kolize. K tomu účelu slouží modul GPS, jež předává informace o současné poloze. Pozice objektu je předávána ve formě zeměpisná šířka, zeměpisná délka a nadmořská výška. Prostorové koordináty jsou tedy předávány v podobě nejbližší sférické souřadnicové soustavy.

### 4.3.1 Sférická souřadnicová soustava

Sférická souřadnicová soustava  $(O; \rho, \varphi, \nu)$  se zavádí tak: V prostoru zvolíme rovinu a v ní polopřímku OA [9]. Dále zvolíme polopřímku OB kolmou k zvolené rovině. Souřadnice  $\rho$  bodu P je vzdálenost  $|OP|$  bodu P od počátku (pólu) O. Souřadnice  $\varphi$  je velikost orientovaného úhlu, který svírá polopřímka OA a polopřímka OP<sub>1</sub>, kde P<sub>1</sub> je průmět bodu P do zvolené roviny ( $0 \leq \varphi < 2\pi$ ). Souřadnice  $\nu$  je velikost orientovaného úhlu, který svírá polopřímka OP s polopřímkou OB ( $0 \leq \nu < \pi$ ). Sféricou soustavu popisuje obrázek 2.



obrázek 2. Sférická souřadnicová soustava

S existencí polární souřadnicové soustavy vyvstává otázka, jestli se jedná o nejvhodnější soustavu pro výpočet kolizí. Ve většině případů se kolize řeší v kartézské soustavě souřadnic. V cylindrické souřadnicové soustavě se kolize nejčastěji neřeší a totéž platí o sférické souřadnicové soustavě. V obou případech jsou vzorce pro výpočet kolizí velmi složité. Pro výpočet kolizí bude použita kartézská soustava souřadnic.

### 4.3.2 Vztah sférické a kartézské souřadnicové soustavy

Souřadnice v kartézské soustavě souřadnic  $(O; x, y, z)$ , resp. ve sférické souřadnicové soustavě  $(O; \rho, \varphi, \nu)$  značíme  $x, y, z$  resp.  $\rho, \varphi, \nu$ . Přitom polopřímka OA splývá s kladnou částí osy  $x$  soustavy  $(O; x, y, z)$  a polopřímka OB splývá s kladnou částí osy  $z$  soustavy  $(O; \rho, \varphi, \nu)$ . Pro převod mezi sférickou a kartézskou soustavou souřadnic jsou definovány vztahy [9]:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (4)$$

$$\sin \varphi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (5)$$

$$\cos \varphi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad \text{pro } \forall \varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle \setminus \{2\pi\}, \quad (6)$$

$$\sin \nu = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad (7)$$

$$\cos \nu = \frac{z}{\rho}, \quad (8)$$

$$\tan \nu = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad \text{pro } \forall \nu \in \langle 0, \pi \rangle, \quad (9)$$

$$\tan \varphi = \frac{y}{x} \quad \text{pro } \forall \varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle \setminus \left\{ \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, 2\pi \right\}, \quad (10)$$

$$x = \rho \sin \nu \cos \varphi, \quad (11)$$

$$y = \rho \sin \nu \sin \varphi, \quad (12)$$

$$z = \rho \cos \nu. \quad (13)$$

### 4.3.3 Koule, elipsoid a geoid jako model země

Pro výpočet pozice v kartézské soustavě souřadnic je důležitý parametr  $\rho$ , což je součet nadmořské výšky a vzdálenosti od středu země k hladině moře v daném místě. Tato definice je ovšem poněkud zavádějící. Pokud by země byla přesná koule, pak by vzdálenost mezi pomyslnou hladinou moře a středem Země byla 6378.132 km. Země ovšem není přesná koule. Jako nejbližší aproximace se nabízí elipsoid. Pak by bylo možné stanovit mnohem přesněji vzdálenost mezi středem Země a hladinou moře. Elipsoid je definován následovně[10]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (14)$$

kde  $a, b, c$  jsou velikosti jednotlivých poloos. Elipsoid je tedy definován velikostí svých poloos a určení jejich rozměrů v případě země je velmi obtížné. Pokud by ovšem velikost všech poloos byla známa, pak určení vzdálenosti hladiny moře od středu Země určují následující vztahy:

$$x = a \sin \nu \cos \varphi, \quad (15)$$

$$y = b \sin \nu \sin \varphi, \quad (16)$$

$$z = c \cos \nu \quad \text{pro } \forall \varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle \setminus \{2\pi\}, \forall \nu \in \langle 0, \pi \rangle \quad (17)$$

$$\rho_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (18)$$

kde  $\rho_1$  je vzdálenost mezi středem Země a hladinou moře. Nejlepší aproximací tvaru Země by měl být geoid. Matematický zápis geoidu je však velice složitý a výpočty s takovým modelem jsou časově velice náročné.

## 4.4 Kolizní model a algoritmy

Pro potřeby vytvářené aplikace je potřeba rozhodnout, jaký typ modelu bude vhodný pro výpočty kolizí a jaké algoritmy budou k vlastnímu výpočtu využity. Dle předpokladu budou řešeny pouze kolize mezi jednotlivými objekty, které budou moci s ostatními komunikovat a předat ostatním informace o své poloze, směru a rychlosti pohybu. Okolní prostředí nebude tedy bráno v úvahu, protože nemá žádnou možnost předat informaci o své poloze. Model prostředí pak bude obsahovat pouze malé množství entit, které by mohly mezi sebou kolidovat. Pro tento typ modelu prostředí je vhodný hraniční model, protože pro malé množství dat v relativně velkém prostoru je velmi úsporný. Jednotlivé objekty budou reprezentovány pouze jako body v prostoru s atributem rychlosti a směru pohybu.

Velmi důležitým aspektem je volba vhodných algoritmů, vzhledem k oblasti použití a očekávaným výstupům. Především je nutné uvážit, že systém musí být schopen odhalit blížící se kolizi, která ještě nevznikla a upozornit na tuto skutečnost. Jedná se tedy především o kvalitní predikci kolize. Aplikace, která by v takové situaci pouze oznamovala již vzniklou kolizi, by byla zbytečná.

## 4.5 Užití konvenčních algoritmů

V aplikacích počítačové grafiky, her a jednodušších fyzikálních simulátorech jsou dnes pro výpočty kolizí prováděny často pomocí algoritmů a datových struktur založených na binárním nebo oktálovém dělení prostoru. Dělení ovšem umožňuje převážně zvýšit rychlost výpočtu kolizí tím, že nejsou prováděny výpočty nad částí prostoru, kde není možné, aby kolize vznikly. Převážně je tímto způsobem dekomponována pouze statická část scény a pohyblivé objekty se nacházejí mimo datovou strukturu binárního nebo oktálového stromu. Tedy tyto algoritmy nejsou prakticky použitelné. Dalším, který je hojně využíván, je obalové těleso jako již zmíněná boundingSphere. Následující z běžně používaných způsobů detekce je kolize dvou trojúhelníků popřípadě kolize trojúhelníku a přímky. Existuje mnoho postupů, jak je možné vyhledá jejich kolizi.

### 4.5.1 Obalové těleso

Princip činnosti algoritmu je poměrně jednoduchý. Každý objekt je celý obsažen uvnitř obalového tělesa. Zjištění kolize je pak pouze výpočet vzdálenosti mezi středy nebo průnik obou těles. V případě, že obalovým tělesem je koule je situace následující:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (19)$$

### 4.5.2 Kolize trojúhelníku a přímky

Zjištění, jestli přímka protíná trojúhelník je většinou rozdělena na dvě základní části. Nejprve je nalezen bod, ve kterém přímka protíná rovinu trojúhelníku a následně je určeno, zda tento bod leží uvnitř trojúhelníku.

Trojúhelník je definován třemi body. Tyto tři body také určují rovinu, ve které tento trojúhelník leží. Obecná definice roviny v prostoru je dána vztahem [11]:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (20)$$

kde koeficienty  $a$ ,  $b$  a  $c$  jsou složkami normálového vektoru roviny, ve které trojúhelník leží. Pak přímka definovaná parametrickým vztahem:

$$x = tv_1 + a_1 \quad (21.1)$$

$$y = tv_2 + a_2 \quad (21.2)$$

$$z = tv_3 + a_3 \quad (21.3)$$

Průsečík je možno stanovit dosazením parametrického vyjádření přímky do obecné rovnice roviny.

Pokud existuje průsečík přímky a roviny trojúhelníka, následuje určení jeho polohy vůči trojúhelníku. Existuje mnoho postupů, jako je součet vrcholových úhlů vnitřních trojúhelníků nebo obdoba pinedova algoritmu. Součet úhlů není příliš vhodný způsob vzhledem k faktu, že pro výpočet používá arcsin, což je výpočetně velmi náročné. Pinedův algoritmus je mnohem vhodnější, ale v trojrozměrné podobě se jeho řešení dělí do mnoha výpočetních větví. Jedním z jednoduchých a velice rychlých řešení je parametrické vyjádření vzdáleností mezi průsečíkem a body, určující trojúhelník.

Pro výpočet je nutné znát polohu vrcholů trojúhelníku  $v_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$  a průsečíku  $p$ . Nejprve je nutné stanovit vektory  $u$ ,  $v$  a  $w$  [12]:

$$\vec{u} = \vec{v}_1 - \vec{v}_0 \quad (22)$$

$$\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_0 \quad (23)$$

$$\vec{w} = \vec{p} - \vec{v}_0 \quad (24)$$

Následně je určena velikost koeficientů  $k$ ,  $l$ ,  $m$ ,  $n$  a  $o$ .

$$k = u^2 \quad (25)$$

$$l = uv \quad (26)$$

$$m = v^2 \quad (27)$$

$$n = uw \quad (28)$$

$$o = vw \quad (29)$$

kde násobení vektorů je dáno jako skalární násobek a není tedy značeno jako násobení vektorů. Skalární násobení vektorů  $u$  a  $v$  je dáno jako:

$$u \cdot v = \sum_0^i u_i v_i \quad (30)$$

S využitím vypočtených koeficientů je možno stanovit, jestli bod  $p$  leží uvnitř trojúhelníku:

$$s = \frac{lo - mn}{l^2 - km} \quad (31)$$

$$t = \frac{ln - ko}{l^2 - km}$$

(32)

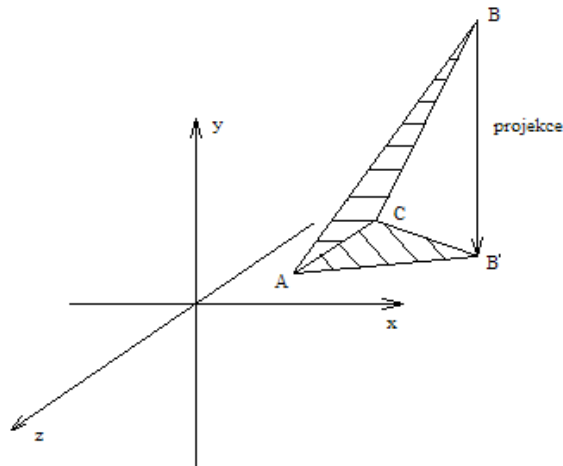
Pokud koeficient  $s$  nepatří do intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ , koeficient  $t < 0$  nebo  $(t+s) > 1$ , pak ke kolizi nedochází. V opačném případě leží bod uvnitř trojúhelníku.

### 4.5.3 Kolize trojúhelníků

Metod detekce kolize dvou trojúhelníků je víc. Mezi nejčastěji používané patří flattening a převod na kolizní přímku.

#### Flattening

Flattening je projekce trojúhelníku do plochy jedné z rovin souřadného systému. Tím je možné např. vypustit koordináty osy  $y$  a zachovat zbylé  $x$  a  $z$ . Metoda potřebuje rozhodnout, která informace bude vynechána, tedy která bude zploštěna. Použitelnou cestou k určení nejvhodnější vynechané souřadnice je sledování normály roviny. To je prováděno tak, že jsou hledány souřadnice, které mají v absolutní hodnotě nejvyšší hodnotu. Poté je možné vybrat rovinu ke zploštění, což je rovina kolmá na osu, ve které byly největší hodnoty souřadnic. Pokud by trojúhelník po zploštění tvořil úsečku, je vybrána jiná možná rovina. Oba zploštělé trojúhelníky jsou zpracovány standardním způsobem pomocí lineární algebry pro zjištění bodu průniku. Pokud je zploštění prováděno podle popsaného algoritmu, pak průnik leží uvnitř obou trojúhelníků [13]. Schéma projekce trojúhelníka do roviny znázorňuje obrázek 3.



obrázek 3. Projekce trojúhelníka

Pro zjištění, zda zploštěný bod průniku leží uvnitř zploštělého trojúhelníku, existuje několik postupů. Například je možné vytvořit rovnice pro každý ze zplošťovaných trojúhelníků. Bez ohledu na to, kterou rovinu promítáme se budeme stále pohybovat v  $x$  a  $y$  souřadnicích zploštěného

trojúhelníku. To je způsobeno redukcí trojrozměrného na dvojrozměrný problém. Nejprve je nutné najít bod ležící uvnitř trojúhelníku. Jedním z možných bodů je střed trojúhelníku. Ten je dán:

$$\left[ \frac{(x_0 + x_1 + x_2)}{2}, \frac{(y_0 + y_1 + y_2)}{2} \right] \quad (33)$$

Tak tedy zjistíme, kterým směrem se nachází vnitřní a vnější část roviny, ve které trojúhelník leží. Tím jsou dány dva vektory  $v_0$  a  $v_1$ . Nejprve je nutné najít přímku  $y = mx + b$  vedoucí skrze ně. Konstantu  $b$  vypočteme pomocí přímky, úhlu a bodu. Jakmile je známa rovnice přímky v průsečíku, je možné zjistit, jestli zploštělý bod leží na straně přímky, která směřuje ke středu trojúhelníku nebo mimo trojúhelník. To je zjištěno porovnáním hodnoty  $y$ . Pokud po přičtení koordinátu  $x$  zploštělého bodu průniku na přímku  $y = mx + b$ , vypočteme hodnotu  $y$  bodu přímky na souřadnicích osy  $x$ . Následně je porovnána poloha středového bodu trojúhelníku vzhledem k přímce. Je známo, že středový bod leží uvnitř trojúhelníku a pokud jeho koordináta  $y$  leží ve stejném směru od přímky jako je poloha bodu průniku, pak i ten leží uvnitř trojúhelníku vzhledem k úsečce  $ab$ . Zmíněný postup je proveden i pro úsečky  $bc$  a  $ca$ . Pokud bod průniku leží uvnitř trojúhelníku pro všechny úsečky, pak leží uvnitř trojúhelníku.

Postupně jsou kontrolovány všechny strany obou trojúhelníků, dokud není nalezena strana, na které dochází ke kolizi s druhým trojúhelníkem. Pokud taková situace nenastane, pak spolu trojúhelníky nekolidují.

## Kolizní přímka

Metoda výpočtu kolize dvou trojúhelníků pomocí kolizní přímky je mnohem efektivnější než flattening. Jak se ukáže později, tento algoritmus bude použit pro výpočet kolizí.

Prvním krokem pro výsledné stanovení kolize je nalezení roviny, ve které leží trojúhelník. Obecná rovnice roviny v prostoru je dána vztahem  $ax + by + cz + d = 0$ . Jednotlivé koeficienty  $a$ ,  $b$  a  $c$  jsou dány normálovým vektorem roviny. Ten je stanoven jako vektorový násobek vektorů ležících v rovině trojúhelníku. Trojúhelník je dán body  $v_0$ ,  $v_1$  a  $v_2$ . Vektory  $u$ ,  $w$  a normálový vektor  $n$  jsou vypočteny podle vztahů [11]:

$$\vec{u} = \vec{v}_1 - \vec{v}_0 \quad (34)$$

$$\vec{w} = \vec{v}_2 - \vec{v}_0 \quad (35)$$

$$\vec{n} = \vec{u} \times \vec{w} \quad (36)$$

Kde při násobení vektorů  $\vec{u}$  a  $\vec{w}$  se jedná o vektorové násobení vektorů definované:

$$n_0 = u_1 w_2 - u_2 w_1 \quad (37.1)$$

$$n_1 = u_2 w_0 - u_0 w_2 \quad (37.2)$$

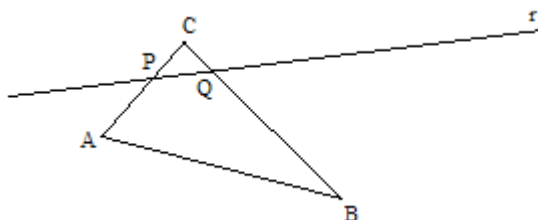
$$n_2 = u_0 w_1 - u_1 w_0 \quad (37.5)$$

Jakmile je pro oba trojúhelníky stanovena rovina, ve které leží, určuje se přímka, ve které se protínají obě roviny trojúhelníků. Jedná se o součet obou rovnic rovin trojúhelníků.

$$(a_1+a_2)x+(b_1+b_2)y+(c_1+c_2)z+(d_1+d_2)=0 \quad (38)$$

Takto vzniklá přímka je kolizní přímkou trojúhelníků.

Kolizní přímka leží v rovinách obou trojúhelníků a pokud nastává jejich kolize, pak tato kolize nastává na kolizní přímce. Problém kolize trojúhelníků se tedy zredukoval na kolizi trojúhelníku a přímky, ležící v rovině trojúhelníku. Situaci popisuje obrázek 4:



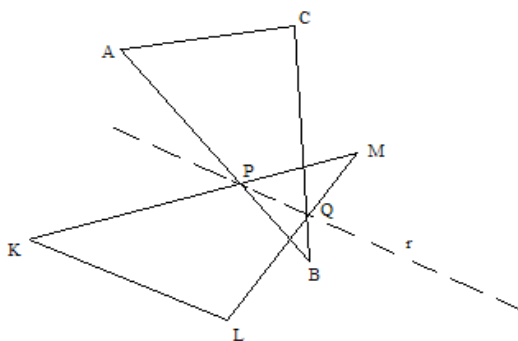
obrázek 4. Kolize trojúhelníku a přímky

Následně jsou určeny vektory  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  a  $\vec{w}$  z vrcholů trojúhelníku. Pokud dochází ke kolizi, pak přímka  $r$  protíná alespoň jednu z úseček AB, BC nebo CA. Jestliže úsečka AC definuje vektor  $\vec{w}$ , pak kolize přímky  $r$  a zmíněné úsečky nastane:

$$t = -\frac{A_1 a + A_2 b + A_3 c + d}{a w_1 + b w_2 + c w_3} \quad (39)$$

kde parametr  $t$  je parametrem přímky dané úsečkou AC. Výpočet je postupně prováděn pro všechny úsečky trojúhelníku. Výsledkem této posloupnosti je dvojice bodů, které leží na příslušných úsečkách a současně leží i na kolizní přímce [9].

Posledním krokem pro určení kolize je zjistit, zda se úsečky PQ obou trojúhelníků alespoň částečně překrývají. To je provedeno dosazením polohy vypočtených bodů do parametrických rovnic přímky, dané úsečkou PQ druhého trojúhelníku. Schéma situace je na obrázku 5.



obrázek 5. Kolize trojúhelníků v kolizní přímce

Úsečka PQ definuje vektor  $\vec{t}$ . Pokud je známa poloha výsledného bodu V, pak z parametrického vyjádření přímky dané body P a Q je možné určit  $s$ , což je interpolační faktor například pro souřadnici  $x$ :

$$s = \frac{V_1 - P_1}{t_1} \quad (40)$$

Výpočet interpolačního faktoru je postupně prováděn pro všechny body ležící na kolizní přímce. Pokud alespoň jeden z kolizních faktorů leží v intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ , pak spolu trojúhelníky kolidují.

Dle předchozího rozboru je algoritmus kolizní přímky poměrně jednoduchý. Jeho největší výhodou je ovšem nízká výpočetní náročnost. Pro výpočet je použito pouze sčítání, odčítání, násobení, dělení a jen několikrát je argument odmocněn.

## 4.6 Predikce kolizí

Jak již bylo zmíněno, pro korektní funkci systému je nutné především v dostatečném předstihu informovat o možnosti vzniku kolize. Jedná se o systém, jehož úkolem je tedy vyhledávat objekty pohybující se kolem něj a zjišťovat, jestli neleží na kolizních drahách. K tomu účelu jsou standardní algoritmy použité běžným způsobem pro řešení kolizí v prostoru nepoužitelné. Bude tedy nutné buď algoritmy použít nestandardně, nebo navrhnout algoritmus vlastní.

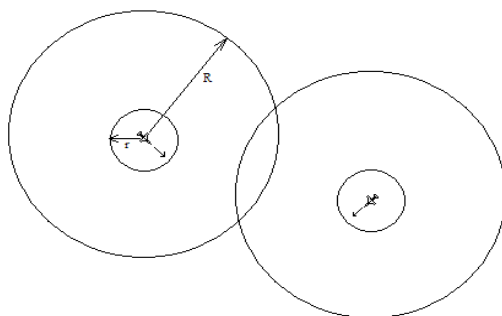
Bude navrženo několik možných způsobů řešení tohoto problému, přičemž bude brána v úvahu výkonová náročnost takového řešení a v neposlední řadě také jeho přesnost.

### 4.6.1 Obalové těleso

Základní princip algoritmu již byl vysvětlen. Pokud by byl použit jako jediný algoritmus pro predikci kolizí, pak by byl naprosto nedostatečný. Pokud by byl použit spolu s jinou metodou vyvažující nevýhody řešení kolizí pomocí obalového tělesa, pak se jedná o velice přínosnou metodu.

Detekce kolizí obalovým tělesem zkoumá, jestli dvě obalová tělesa nemají společný průnik. Neřeší ovšem, jakým směrem se tělesa pohybují, tedy jestli se pohybují po kolizních drahách. Pro předpovídání možných kolizí je sice tento způsob nedostatečný, ale umožňuje vyloučit mnoho těles nacházejících se v příliš velkých vzdálenostech nebo naopak ležících příliš blízko sebe na to, aby bylo možné kolizi predikovat.

Prostor kolem objektu je tedy možno rozdělit pomocí dvou obalových těles. Těleso s menším poloměrem uzavírá část prostoru, ve kterém hrozí bezprostřední nebezpečí kolize. Druhé těleso odděluje část prostoru, kde je již nutné řešit možné vznikající kolize. Pro objekty, jejichž obalová tělesa mají neprázdný průnik jsou již řešeny kolize. Situace je zobrazena na obrázku 6:



obrázek 6. Kolize obalových těles

Jako ilustrace poslouží situace z obrázku 6. Dvě obalová tělesa mají neprázdný průnik a již budou řešeny kolize. V kontaktu jsou ovšem pouze obalová tělesa s větším průměrem  $R$ , pro výpočet kolize je tedy brán v úvahu směr pohybu a rychlost obou těles. Pokud by spolu kolidovaly i obalová tělesa s menším poloměrem  $r$ , riziko hrozící kolize by bylo natolik vysoké, že by již nebyl brán v úvahu směr pohybu jednotlivých objektů a bylo by upozorněno na vysokou možnost vzniku srážky.

Prostor je rozdělen do tří podoblastí z hlediska nebezpečnosti vzniku kolize. Pokud spolu kolidují nejmenší obalová tělesa, již je riziko velmi vysoké. Tělesa jsou příliš blízko sebe a také poloha objektu nemusí být určena naprosto přesně. Pokud obalová tělesa s větším poloměrem mají neprázdný průnik, pak je možné, že se pohybují po kolizních drahách, ale pro predikci jejich střetu je použit také směr a rychlost pohybu.

## 4.6.2 Směrová predikce

Jestliže se dvě tělesa v prostoru pohybují určitým směrem, je možné určit, jestli leží v kolizních drahách. Takových postupů je možno najít mnoho, proto budou řešeny pouze některé relevantní. Nejprve bude řešen průsečík přímek, následně kolize přímkou a kužele, dvou kuželů a dvou torů. Jiná tělesa, jež by aproximovala možný směr pohybu nebudou brána v úvahu především proto, že výpočet by byl značně složitější a nevedl by k výrazněji vyšší odolnosti vůči chybám v určení polohy a směru pohybu.

### Kolize přímek

Těleso v prostoru je možné aproximovat jako hmotný bod určený souřadnicemi a směr pohybu jako přímkou procházející tímto hmotným bodem. Pak se z kolize dvou těles stává kolize dvou přímek v prostoru. Takové řešení je jednoduché a výpočetně nenáročné, ovšem předpokládá, že tělesa lze uvažovat jako hmotné body. Prakticky toto ovšem není možné.

Těleso není možné aproximovat hmotným bodem. Pak tedy situace, kdy se přímkou v prostoru jen těsně minou stává kolizí. Metoda mimo jiné předpokládá naprosto přesné informace o poloze a směru pohybu těles. Pokud by kterákoli složka informací byla zatížena nějakou chybou, pak tento způsob výpočtu bude podávat chybné výsledky.

Kolize přímek se jeví jako způsob řešení kolizí, který není vhodné použít. Poslouží pouze jako koncept pro další metody [12].

### Kolize přímkou a kužele

Jedná se o zvýšení robustnosti výpočtu kolize dvou přímek. Tělesa jsou v prostoru také aproximována jako hmotné body, směr pohybu prvního tělesa je dán přímkou, ale směr pohybu druhého tělesa je dán jako kužel. Tím je částečně možné eliminovat nepřesnosti v daném vektoru směru a také situaci, kdy by se přímkou v prostoru jen těsně minuly [10].

Kužel v prostoru je definován parametrickými rovnicemi, kde parametrem  $\alpha \in \langle 0; 2\pi \rangle$  je úhel a souřadnice z:

$$x = z \cos \alpha \quad (41.1)$$

$$y = z \sin \alpha \quad (41.2)$$

Příčemž je nutné vzít v úvahu situaci, kdy kužel, který představuje pravděpodobný směr pohybu je v prostoru orotován. Výsledný parametrický tvar kužele v prostoru je tedy:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \cos \alpha \\ z \sin \alpha \\ z \end{bmatrix} \quad (42)$$

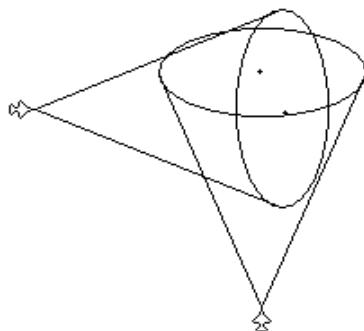
kde matice koeficientů  $a_{i,j}$  je maticí transformace soustavy dané směrem pohybu objektu, koeficienty  $x_p, y_p, z_p$  značí pozici objektu v kartézské soustavě souřadnic [12].

Jestliže tedy dosadíme parametrické vyjádření přímky definující směr pohybu tělesa za koeficienty  $x, y$  a  $z$ , vznikne soustava tří rovnic o třech neznámých, kterou je možné řešit.

Kolize přímky a kužele je mnohem odolnější vůči situacím, kdy tělesa daná hmotnými body se směrem definovaným přímkami jen těsně minuly. Ovšem stále není odolná vůči chybám v určení směru pohybu prvního tělesa a chybám určení poloh obou těles. Zanedbatelný už není ani fakt, že pro řešení soustavy rovnic už je nutný výpočet goniometrických funkcí  $\arccos$  nebo  $\arcsin$  a ty jsou časově velmi náročné. Možnou náhradou kužele je jemu opsaný jehlan, který by byl složen z trojúhelníků a výpočet kolizí by byl dekomponován na množství kolizí přímky a trojúhelníků.

## Kolize dvou kuželů

Je zobecnění předchozí situace. Tělesa jsou v prostoru stále aproximována jako hmotné body, ale směr pohybu obou těles je dán kuželem. Tím je již možné výrazně eliminovat situace, kdy by se původní přímky v prostoru jen těsně minuly. Mnohem lépe také ošetřuje stav, kdy objekt během pohybu mění směr [13]. Metoda však stále neřeší nepřesnosti určení polohy těles. Schéma problematiky je znázorněno na obrázku 7.



obrázek 7. Kolize dvou kuželů směru pohybu

Jestliže tedy uvažujeme možný směr pohybu těles jako dva kužely, pak je jejich vzájemná kolize vyjádřena vztahem:

$$\begin{bmatrix} x_{p1} \\ y_{p1} \\ z_{p1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \cos \alpha_1 \\ z_1 \sin \alpha_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{p2} \\ y_{p2} \\ z_{p2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & b_{2,3} \\ b_{3,1} & b_{3,2} & b_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_2 \cos \alpha_2 \\ z_2 \sin \alpha_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

kde matice koeficientů  $a_{i,j}$  a  $b_{i,j}$  jsou matice transformací soustav daných směrem pohybu objektů, koeficienty  $x_p, y_p$  a  $z_p$  značí pozici jednotlivých objektů v kartézské soustavě souřadnic. Parametry dané soustavy jsou  $z_1, z_2, \alpha_1$  a  $\alpha_2$ .

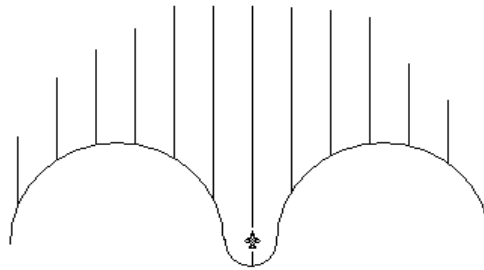
Pro řešení takové soustavy jsou navíc nutná určitá omezení, jinak by se jednalo o soustavu tří rovnic o čtyřech neznámých.

Kolize dvou kuželů je mnohem odolnější vůči chybám, ale je výpočetně velmi náročná. Při výpočtu je použito také funkcí  $\arccos$  nebo  $\arcsin$  a jejich výpočet je časově velice náročný.

Jako v případě kolize kužele a přímky je možné kužel nahradit jehlanem, který je danému kuželu opsán. V případě kolize dvou jehlanů je prováděn výpočet kolize trojúhelníků, ze kterých jsou jehlany složeny.

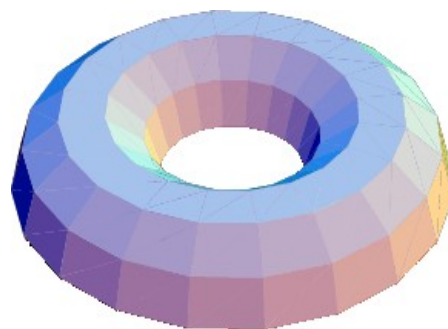
## Kolize dvou torů

Pokud jsou brány v úvahu všechny nepřesnosti určení polohy a směru pohybu objektu, pak jeho příští polohu by bylo možné popsat obrázkem 8.



obrázek 8. Možný výskyt tělesa

Jestliže by byly zobecněny do prostoru hranice tohoto rovinného řezu představující oblast, kde mohou vznikat kolize, výsledný obraz by představoval polovinu tělesa zvaného torus zobrazeného na obrázku 9.



obrázek 9. polovina toru

Torus je v geometrii útvar, který vznikne rotací která leží ve stejné rovině [13]. Parametricky je torus vyjádřen jako:

$$x = (R + r \cos v) \cos u \quad (44.1)$$

$$y = (R + r \cos v) \sin u \quad (44.2)$$

$$z = r \sin v \quad (44.3)$$

kde  $R$  je poloměr od středu toru do středu „trubice“,  $r$  je poloměr „trubice“ a  $u, v \in \langle 0; 2\pi \rangle$ .

Hranice každého toru představují možné hranice, kde se může těleso pohybovat. Pravděpodobný směr pohybu objektu je totožný s hlavní osou toru. Oba tory jsou tedy navíc v prostoru orotovány podle směru pohybu tělesa. Výsledné těleso definující hranice, kde se může objekt vyskytovat je definováno vztahem:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (R + r \cos v) \cos u \\ (R + r \cos v) \sin u \\ r \sin v \end{bmatrix} \quad (45)$$

kde matice koeficientů  $a_{i,j}$  je maticí transformace do soustavy dané směrem pohybu objektu, koeficienty  $x_p, y_p, z_p$  značí pozici objektu v kartézské soustavě souřadnic.

Jakmile jsou k dispozici všechny koeficienty, je možno sestavit soustavu rovnic pro řešení kolize dvou torů. Soustava musí mít několik dalších omezení, aby bylo možno takový systém rovnic řešit.

Kolize dvou objektů pohybujících se v prostoru je možné tímto způsobem řešit poměrně přesně i v případě, že informace o poloze a směru pohybu objektu nejsou přesné. Nevýhodou takového postupu je velká výpočetní náročnost.

Jistě by bylo možné torus také aproximovat množinou trojúhelníků, ale jejich množství by bylo příliš vysoké a tím také nároky na výkonnost použitého zařízení.

## 4.7 Použité algoritmy

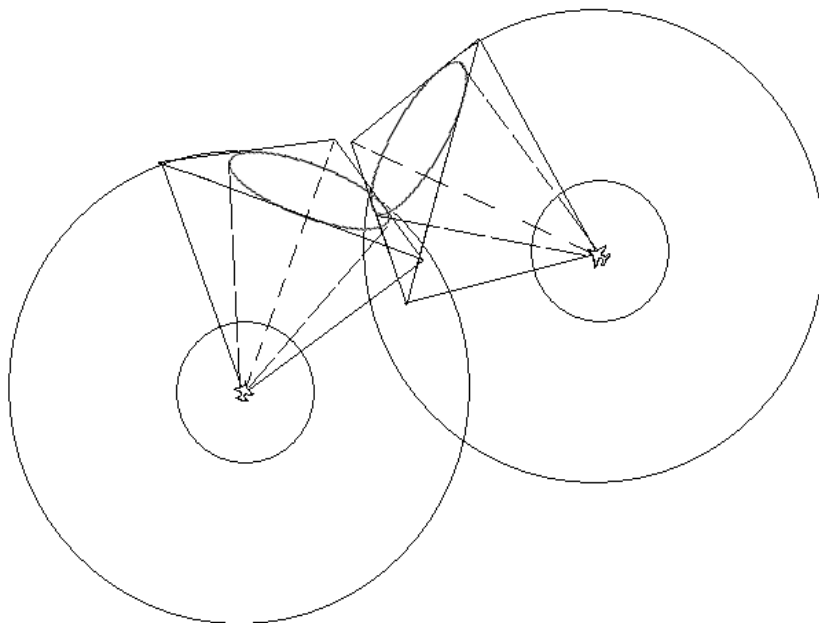
Existuje více metod, jak lze v prostoru řešit kolize a jejich predikci. Některé algoritmy jsou jednoduché a velice rychlé, ale jejich přesnost a odolnost vůči chybám je nízká. Jiné jsou naopak přesné i odolné vůči chybám, ale výpočetně velice náročné. Z množství navržených způsobů je nutné vybrat ty, jež svými vlastnostmi nejlépe vyhovují kategorii problému, kterou mají řešit v závislosti na očekávaném výkonu zařízení.

Prvním z použitých je algoritmus obalových těles. Jeho začlenění sice neřeší přímo predikci kolizí, ale může výrazně snížit počet objektů, se kterými budou kolize řešeny. Navíc pokud bude objekt v menší vzdálenosti, než je jistá kritická vzdálenost bude automaticky předpokládáno, že mezi objekty již může dojít k přímému kontaktu.

Metodou pro řešení kolizí v závislosti na směru pohybu je kolize dvou kuželů. Jak již bylo zmíněno, algoritmus pro dva kužely je výpočetně náročný a proto bude každý kužel aproximován jehlanem. Plášť jakéhokoli jehlanu je možné sestavit z trojúhelníků. Výpočetní složitost je ovšem

závislá na počtu trojúhelníků, ze kterých je jehlan složen a proto je kužel aproximován nejjednodušším opsaným jehlanem a to čtyřstěnem. V takovém případě bude řešeno šestnáct kolizí dvou trojúhelníků. Obrázek 9. obsahuje výsledné schéma řešení kolizí mezi dvěma pohybujícími se tělesy.

Pro každý objekt je nejprve vypočteny vzdálenost, ve které se nachází a z ní je stanoveno, jestli se nachází ve vzdálenosti, která je ještě pro řešení kolizí příliš velká, nebo je objekt již v prostoru, kde je možné predikovat možnost srážky. Pokud je již objekt v oblasti, která je relevantní pro výpočet kolizí, pak je zkonstruován jehlan pravděpodobného směru pohybu pro oba objekty a je vypočtena kolize. Pokud se ovšem objekty nachází příliš blízko sebe pro stanovení kolize ve směru pohybu, není kolize již řešena a je vydáno příslušné varování.



obrázek 9. kolizní schéma

# Kapitola 5

## Předávání koordinát

Jedním z nejdůležitějších úkolů antikolizního systému je předávání informací o své poloze, rychlosti a směru pohybu všem ostatním objektům v okolním prostoru. Zařízení tedy musí obsahovat modul, který bude zasílat a přijímat potřebné informace.

Komunikační prvek musí být schopen přenášet informace v prostředí, ve kterém se bude běžně pohybovat, tedy musí být navržen s ohledem na množství přenášených dat, použitelná přenosová média, výkonovou nenáročnost a použitelný komunikační model.

Systém musí poskytovat ostatním úplnou informaci pro potřeby výpočtu kolizí. Jde o polohu v trojrozměrném prostředí, směr pohybu a rychlost. Jedná se tedy o poměrně malé množství dat, přičemž vždy je možné tyto informace uložit do paměti stejné velikosti. Z hlediska komunikace se jedná o datový rámec s konstantní délkou.

### 5.1 Prostředí

Návrh komunikačního zařízení je ovlivněn mnoha podmínkami, ale jedna z nejdůležitějších je prostředí, ve kterém se celá komunikace bude odehrávat. Již od základu musí být systém koncipován jako zařízení, které bude pracovat v letadle, pak komunikace bude muset probíhat pouze bezdrátovou cestou.

Bezdrátové odesílání a přijímání informací má své specifické vlastnosti. Data jsou přenášena pomocí signálu v elektromagnetickém spektru vysílaného do vzduchu, což přináší některé nesporné výhody, ale i problémy. Ke komunikaci není potřeba žádný vodič propojující jednotlivé účastníky, kteří mohou odesílat i přijímat zprávy. Ti se mohou pohybovat všude v dosahu vysílaného signálu, aniž by byli omezeni v možnostech přijmout informace popřípadě je odeslat. Ovšem vyslaný signál se šíří prostředím, kde se mohou vyskytovat různé vlivy. Vzduch jako komunikační médium může využívat prakticky kdokoli, nelze tedy médium vlastnit a mít k němu výhradní přístup. Je tedy možné, že zvolený komunikační kanál bude chtít využívat některá třetí strana. Data zasílaná bezdrátovou cestou také mohou být přijata kýmkoli, což souvisí s oblastí bezpečnosti pro odeslané informace. Samostatnou problematikou bezdrátové komunikace jsou překážky, kdy příjemce není v dosahu signálu, protože se nachází v oblasti, která je zastíněna nějakým objektem. Při samotném příjmu se může stát, že je přijat odražený signál. V neposlední řadě se také mohou vyskytovat různé typy rušení, interference a také může docházet z různých důvodů ke ztrátám dat nebo ke zpoždění při příjmu.

Jeden ze zmíněných problémů je řešen zákonem příslušného státu, kdy není možné využívat libovolné pásma ke komunikaci, ale jen ty, jež jsou určeny k volnému použití pro veřejnost. Některé ze zmíněných nevýhod lze eliminovat volbou vhodného komunikačního modelu a protokolu. Nelze ovšem odstranit vlastnosti prostředí, tedy pokud se komunikující objekt nachází v oblasti s velmi silným rušením nebo je zastíněn překážkou, bezdrátová komunikace nebude funkční. Přes všechny zmíněné problémy je rádiová komunikace jediným přijatelným řešením pro vzájemnou komunikaci ve vyvíjeném systému.

## 5.2 Modely komunikace

Samotný způsob řízení výměny zpráv má jisté pravidla, na základě kterých se dělí do dvou základních skupin podle metody řízení nebo hierarchie a obecně lze každou komunikaci pomocí bezdrátové sítě, kde každý účastník může vysílat i přijímat informace, zařadit do některé z nich. Obě skupiny mají odlišné vlastnosti a jsou vhodné pro jiný typ komunikačního protokolu. Obecně je systém komunikace vybírán podle potřeb komunikujících uzlů a komunikačního média, které má být použito.

### 5.2.1 Model klient - server

Jedná se o častěji využívanou metodu řízení výměny zpráv. Až na výjimky jde o hierarchický model, kde nadřazené uzly – servery jsou propojeny ve stromové struktuře. Nejvýše postavený kořenový uzel je vždy server ke kterému mohou být připojeny další servery nebo jednotliví klienti. Každý ze serverů, které jsou připojeny ke svému nadřazenému serveru mají vůči svým podřazeným uzlům stejnou funkci, jako má nadřazený kořenový server vůči všem podřazeným uzlům a tedy server připojený jako uzel k serveru se chová vůči tomuto serveru jako klient. Servery a jejich hierarchické propojení tvoří jádro sítě.

Komunikace probíhá vždy pouze mezi klientem a serverem. Klient požaduje od serveru poskytnutí nějaké služby, kterou může být i odeslání zprávy jinému klientovi. Požadavek je serverem vyhodnocen, poté je buď daná služba vyhodnocena a klient je seznámen s výsledkem, nebo je klientovi sděleno odmítnutí poskytnutí dané operace. Pokud byl požadavek přijat, server provede další kroky k vykonání služby. Komunikace samozřejmě probíhá i do serveru ke klientovi a to například v případě doručení informací.

Komunikace klient – server je častěji využívána především proto, že větší část operací a složitější činnosti v rámci přenesení informace provádí server. Klient může komunikovat pouze se serverem, což zjednodušuje protokol a zmenšuje počet různých anomálií. Mezi velké výhody také patří mnohem lepší využití přiděleného komunikačního pásma a v případě stability služeb serveru i velkou spolehlivost. Při použití vhodného protokolu není problémem zpoždění nebo ztráta dat

Jistou nevýhodou znamená ovšem fakt, že určité uzly sítě jsou určeny jako servery a vykonávají více operací než koncové klientské uzly. Jedním z velkých problémů modelu klient server je stav, kdy server z jakýchkoli důvodů nemůže vykonávat svoji činnost. V takovém případě jsou všechny připojené uzly v situaci, kdy nemohou komunikovat. V případě zmíněného výpadku některého serveru postaveného vysoko v komunikační hierarchii, by zmíněný problém znamenal

výrazné snížení funkčnosti sítě. Z tohoto důvodu jsou servery ve většině případů přístroje, které jsou pevně vázány k nějakému místu, kde je technicky možné jejich funkčnost zajistit co nejlépe a vzájemná komunikace mezi servery probíhá pokud možno spolehlivými linkami. Značná část serverů pracujících v oblasti bezdrátových sítí proto se svými klienty komunikuje pomocí rádiového vysílání, ale jednotlivé servery jsou v mnoha případech připojeny k ostatním serverům již pomocí nějaké jiné bezpečnější formy jako je metalický nebo optický kabel.

## 5.2.2 Model peer to peer

Komunikace peer to peer je založena na mnohem jednodušším principu, což je většinou vyváženo vyšší složitostí protokolu a jedná se o velice málo používaný komunikační model. Systém komunikace peer to peer není hierarchický, tedy neexistuje zde žádný server, od kterého jsou požadovány služby. Každý uzel má stejnou funkci.

Výměna zpráv není pevně standardizována, jako je tomu u modelu klient server. Většinou je výhradně řízena protokolem, ale základní schéma odesílání dat je téměř vždy společné pro všechny. Pokud uzel potřebuje odeslat informace některému dalšímu uzlu, jednoduše zkusí navázat spojení a v případě, že se to podaří odešle data. Jako základní schéma je tato metoda sice jednoduchá, ale díky vlastnostem komunikačního média, ať se jedná o metalickou a optickou linku nebo bezdrátové vysílání, je použitý protokol velmi komplikovaný.

I model peer to peer má své nesporné výhody. Neexistuje zde hierarchie, tedy v případě výpadku jednoho uzlu není možná komunikace pouze se zmíněným uzlem. Toto se stává mnohem závažnější v prostředí bezdrátové výměny dat, kde se vyskytuje mnoho nepříznivých vlivů okolí. Žádná stanice nemusí být pevně vázána na jedno určité místo, není tedy potřeba vlastnit specializované zařízení použité pouze pro potřeby komunikace mezi jednotlivými uzly. Při použití systému peer to peer má mnohem menší vliv na stabilitu celé sítě rušení signálu.

Systém komunikace peer to peer je pouze teoretickým modelem, který se v praktickém provedení setkává s mnoha problémy především v oblasti rádiového přenosu dat. Pravděpodobně největší nevýhodou je vlastnost komunikačního kanálu. Jestliže jeden uzel v určitý čas odesílá informace, žádný jiný uzel nemůže v tentýž čas začít komunikovat stejným způsobem pomocí právě používaného kanálu. Tedy v rámci okruhu, který je schopen pokrýt vysílač je možné, aby v jednom čase odesílal data pouze jeden uzel. Zmíněný problém je řešitelný například vysláním signálu zakódovaného pomocí PRN (pseudonáhodného čísla), ale to je použitelné pouze pro omezený počet vysílačů a konstrukce vysílače je složitá. Alternativním způsobem je také přidělené pásmo frekvenčně rozdělit pro několik vysílačů. Problém je ovšem také řešitelný na úrovni protokolu, kdy je připuštěna možnost, že dva i více modulů začnou vysílat v jeden čas. Poměrně širokým tématem je doručení zprávy objektu, se kterým není možné navázat přímé spojení, ale je v přímém spojení s jiným modulem. Systém peer to peer, na rozdíl od modelu klient server, je mnohem méně odolný vůči ztrátě dat, zpoždění, interferenci a odrazu signálu.

I přes mnoho zmíněných problémů je schéma komunikace peer to peer stále využíváno, i když se většinou jedná o speciální případy, kdy je model klient server nepoužitelný. Některé družicové systémy používají pro vzájemnou synchronizaci právě schéma peer to peer.

## 5.3 Komunikační schéma

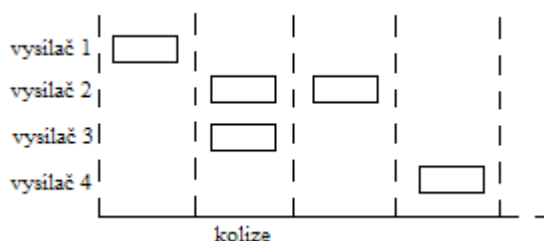
Předávání zpráv bude muset odpovídat jednomu modelu z již uvedených. Systém klient server je mnohem robustnější, ale pro svou funkci potřebuje specializované uzly – servery. Ustanovení takových prvků by bylo náročné na provedení. Servery by se musely rozmístit natolik hustě, aby nemohla nastat situace, kdy se některý modul vyskytne mimo dosah signálu některého z nich. Prakticky opačným požadavkem je fakt, že oblasti pokryté signálem jednotlivých serverů by se pokud možno neměly ani částečně překrývat. Prakticky by tento požadavek znamenal potřebu pokrýt veškeré prostředí, kde se budou stroje pohybovat, signálem serverů a to je téměř nemožné.

Model komunikace bude tedy odpovídat metodě peer to peer. Každý modul je naprosto samostatný a není zapotřebí serverů. Tato výhoda je do značné míry vyvážena nutností přizpůsobit protokol situacím, kdy vzniknou chyby ve vysílání případně příjmu signálu.

### 5.3.1 Vlastnosti schématu

Metoda komunikace dle modelu peer to peer je decentralizovaná, tedy každý prvek je plnohodnotným protějškem pro příjem či odesílání dat. Schéma je ve většině případů použito jako základní model pro jednoúčelovou komunikaci např. synchronizace polohy družic atp. a z toho plyne, že vlastní síťový model je velice jednoduchý, na rozdíl od vrstveného modelu sítí klient server. Existuje několik kritérií, jakými je výměna informací a podoba protokolu v modelu peer to peer vymezena.

Jedeno z nejdůležitějších rozdělení je dle využití pásma. Výměna dat pomocí rádiových vln vždy probíhá na nějaké nosné frekvenci a přiděleném pásmu. Jde tedy pouze o to, jakým způsobem je komunikační kanál využit. Asi nejlépe je tomu při vysílání zakódovaného signálu pomocí PRN. V jeden časový okamžik může vysílat i přijímat kterýkoli prvek a nezpůsobuje tím žádné chyby. Takových prvků je ale pouze omezený počet a jedná se o metodu náročnou na konstrukci vysílače i přijímače. Jiným možným řešením je sdílení daného pásma a to buď vytvořením časových úseků, ve kterých je možno vysílat, nebo přidělený kmitočtový rozsah je frekvenčně rozdělen mezi komunikující strany. Rozložení pásma na několik frekvenčních rozsahů je také použitelné pouze pro omezený počet vysílačů. Na obrázku 10. je znázorněno rozdělení pásma na časové úseky – timesloty. Pro druhý úsek je zobrazena kolize vysílačů.



obrázek 10. rozdělení na časové úseky

Pro využití při větším počtu komunikujících stran je tedy přijatelným řešením vytvoření timeslotů nebo pásmo nedělit vůbec. Pokud nejsou zavedeny při řízení komunikace časové úseky, maximální využitelnost přiděleného pásma je asi 20 %, ale s nimi je možno vytížit pásmo až ke 37%.

Je možné také různým způsobem reagovat na vzniklou chybu. Jestliže při komunikaci nastane okamžik, kdy vysílají dva a více vysílačů, pak je možné vzniklou situaci řešit různým způsobem. Nejsnadnějším z nich je ukončit vysílání všech zúčastněných, kteří se pokusí odeslat informace v jiný čas. Složitějším postupem je v dané situaci odeslat všem oznámení daného stavu a pokusit se o vyslání dat později.

Existuje ještě víc hledisek pro rozdělení komunikačního schématu, jako je například synchronizace, ale pro vlastní návrh již nejsou příliš podstatné.

## 5.4 Návrh protokolu

Pro bezdrátovou komunikaci mezi jednotlivými moduly je nutné v souladu s rozбором použité metody zavést jednotný způsob předávání zpráv a reakcí na ně, tedy protokol. Jako každý i tento protokol musí přesně a jednoznačně specifikovat formát a pořadí zasílaných zpráv, jejich příjem mezi dvěma a více entitami v prostředí a na reakce úspěšné i neúspěšné přijetí a odeslání zprávy.

Při návrhu je vhodné se inspirovat již existujícími protokoly dané kategorie. Mezi nejpoužívanější patří metoda CSMA a ALOHA. Výsledný algoritmus je nejvíce podobný metodě CSMA/CD(carrier sense multiple access/collision detection). Zásadní úprava byla provedena pouze rozdělením vysílacího času do časových úseků. Při komunikaci bude s výhodou využito faktu, že signál může přijmout kdokoli, kdo je v dosahu, z každého vysílače se šíří vysílání pro všechny. Jedná se o jistou podobu broadcastu.

Vlastní komunikace probíhá v nekonečném cyklu dle následujícího algoritmu zapsaného v pseudokódu. Systém komunikace je pro všechny uzly shodný.

Pseudokód komunikačního protokolu:

```
if(volný kanál) and (začátek časového rámce) and (zpráva neodeslána)
{
  odešli zprávu;
  if (příjem jiné zprávy)
  {
    ukončit vysílání;
    vyslat signál kolize;
    nastavit indikaci kolize;
    počkat náhodně dlouho;
  } else {
    dokončit vysílání;
    indikace odeslání zprávy;
    vymazat indikaci kolize;
  }
} else {
  přijímat zprávu do konce;
  if not(zpráva poškozena)
  {
    zařadit informace pro výpočet kolizí;
  }
}
```

Algoritmus je způsobem řízení totožný s metodou CSMA/CD, která se liší od standardní pouze detekcí kolize při vysílání.

### 5.4.1 Vlastnosti protokolu

Komunikace je tedy proti vzorovému pozměněna pouze o indikaci kolizního stavu. Stejně jako u jakékoli podoby metody CSMA je mimo okamžiků vysílání systém v pohotovostním stavu, kdy pouze přijímá informace vyskytující se v komunikačním kanálu. Pokud přijme nepoškozený rámec, je předán k výpočtu kolizí objektů. Jestliže je datový rámec poškozen, není brán v úvahu. V případě příjmu signálu indikující kolizi vysílání, je stávající datový rámec také zahozen. Jestliže je úkolem systému odeslat datový rámec, tak v okamžiku začátku časového rámce je zjištěno, jestli je pásmo volné pro použití. Neobsazené pásmo umožňuje odeslat všem ostatním polohu, směr a rychlost pohybu. Pokud jsou v daný okamžik v přiděleném pásmu přenášena data, není možné odeslat datový rámec a je nutné zkusit obsadit některý z pozdějších časových úseků. Potíž tedy nastává pouze ve způsobu identifikace stavu, kdy vysílají dva nebo více vysílačů.

Z navržené úpravy protokolu CSMA/CD vyplývají dva základní problémy a to detekce současného vysílání dvou vysílačů a zjištění odeslaného kolizního signálu. Kolizní signál (JAM) je speciální datový rámec, který všem příjemcům v dosahu označuje stav existence kolize a z ní vyplývající nutnosti opakovat vysílání koordinátů. Jedinou vlastností bloku je jeho nutná jednoznačná identifikovatelnost, což lze zajistit například přidáním ke každému běžnému datovému rámcí klíč odesílatele a kolizní signál by obsahoval jedinečnou značku, která nemůže být přidělena jako rozlišovací znak žádnému přístroji.

Podstatným omezením je také počet komunikujících. Jakmile se pokouší zasílat data příliš velký počet modulů, začne růst počet kolizí signálu až do situace, kdy již nebude možné pro jejich množství vůbec odesílat koordináty.

### 5.4.2 Kolize vysílání

Značně složitou situací je detekce souběžného vysílání. Většinou jsou komunikační protokoly, využívající sdílené pásmo rozdělením na časové úseky nasazeny v sítích nepoužívajících bezdrátové vysílání, převážně tedy probíhá přenos pomocí kovových vodičů nebo optických vláken. Zjištění, zda médium právě používá ještě i jiný vysílač je v bezdrátových sítích mnohem komplikovanější. Situaci je možné řešit sestavením dvojice vysílač – přijímač nebo testováním dat přijatých z komunikačního kanálu do určité doby po odeslání zprávy [14].

### Vysílač - přijímač

V případě sestavení dvojice vysílač a přijímač je situace mnohem lépe vyřešena z pohledu použitého protokolu, ale je velmi obtížně sestavitelná. Přijímač je neustále v pohotovostním režimu a pouze přijímá data přicházející z komunikačního kanálu. Vysílač v okamžiku potřeby začne šířit data, ale takovým způsobem, že odesílanou zprávu porovná současně i s přijímačem, který by měl přijmout odeslané informace v nezměněné podobě. Takové řešení je sice elegantní a velmi efektivní, ale obtížně realizovatelné. Jestliže by se vysílač nacházel relativně blízko přijímače, pak by jeho

odesílaný signál byl výrazně silnější, než signál jiného vysílače vyskytujícího se sice výrazně dál, ale zmíněné vysílání jiného zařízení značí kolizní situaci, která by nemusela být správně určena. Řešením by mohl být například rozdílový zesilovač, který by zesílil i minimální změny v odeslaném a přijatém signálu. Velkou slabinou se pro tuto realizaci stane šum vyskytující se v přijatém signálu. Ten může způsobit velké zkreslení získaných výsledků [15].

## Sledování dat

Jiným řešením je sledování dat přijatých po odeslání koordinátů. V této situaci je pouze jedno zařízení, jež je schopno v daný okamžik buď vysílat nebo přijímat signál. Po jeho vyslání se šíří prostředím určitou rychlostí a k jednotlivým přijímačům dorazí s různým zpožděním. Vysílač tedy odešle datový rámec a dle protokolu přejde do pohotovostního stavu, kdy pouze přijímá zprávy. Jestliže po změně funkčních režimů z vysílače na přijímač je přijat neúplný datový rámec, pak nastala kolize a je třeba provést příslušná opatření. Velkým problémem je zde synchronizace modulů a správné rozvržení časových úseků, po které je ještě rámec považován za poškozený a kdy již není šířena identifikace kolize [14].

## 5.5 Struktura rámce

Pro definovaný protokol je již nutné pouze stanovit přesnou podobu zpráv. Jak bylo poznamenáno v úvodu kapitoly, odesílaný rámec musí obsahovat pouze informaci o pozici, rychlosti a směru pohybu, které musí být uloženy v pevně definované podobě do datového rámce. Každý takový rámec tedy obsahuje 3 souřadnice pozice v prostoru a 3 souřadnice směru. Rychlost pohybu bude určena jako velikost vektoru směru čímž bude dosaženo zmenšení rámce. Aby nedocházelo během jednoho cyklu výpočtu k opakovanému vyhodnocování kolize se stejným modulem, bude přidána informace o čísle – identifikátoru daného zařízení. Každé zařízení bude mít pevně definovaný identifikátor unikátní v rámci všech takových zařízení.

Tabulka 7: Rozdělení rámce

| identifikátor | X pozice | Y pozice | Z pozice | X směr | Y směr | Z směr | Kontrolní součet |
|---------------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|------------------|
| 2-4 byte      | 4 byte   | 4 byte   | 4 byte   | 4 byte | 4 byte | 4 byte | 2-4 byte         |

První řádek tabulky 7 uvádí rozmístění jednotlivých prvků komunikačního rámce, druhý řádek obsahuje odhadované velikosti jednotlivých složek. Velikost identifikátoru a kontrolního součtu bude stejná (2 nebo 4 byte). Do rámce byl přidán kontrolní součet pro případ, že nastane chyba v komunikaci a aby bylo možné ji detekovat, případně se pokusit celý přenos opakovat.

### 5.5.1 Kolizní signál

Pro navrženou strukturu rámce je nutné stanovit podobu kolizního signálu tak, aby nebyl v žádném případě zaměnitelný s běžným typem zprávy. I když lze předem předpokládat, že některá kombinace

souřadnic polohy a směru nemůžou v praktickém nasazení vzniknout, je vhodnější k účelu identifikace zvolit jinou možnost. Pak je tedy nutné použít část rámce rezervovanou pro identifikaci modulu a kontrolní součet. Jestliže je každému zařízení přiděleno jednoznačné identifikační číslo, pak je účelné jedno z nich rezervovat pro odesílaný kolizní signál. Jednoznačnost tím bude zajištěna a nebude porušen jednotný model komunikačního rámce.

Výsledná podoba kolizního rámce je dána identifikátorem, polohou, směrem a kontrolním součtem.

Tabulka 8: Kolizní rámec

| identifikátor | X pozice | Y pozice | Z pozice | X směr | Y směr | Z směr | Kontrolní součet |
|---------------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|------------------|
| 0             | 0        | 0        | 0        | 0      | 0      | 0      | 0                |

Ideálním řešením je zvolit identifikátor vysílajícího stejně jako ostatní položky rámce nulové. Každý vysílající modul by měl rozpoznávací hodnotu větší než nulu. Jestliže budou celý zbytek kolizního rámce nulový, pak by se jednalo o situaci, kdy se objekt nachází ve středu země a nepohybuje se, což je pro letadlo naprosto nereálný stav.

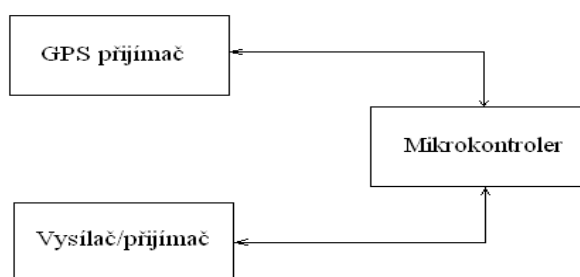
# Kapitola 6

## Realizace systému

Pro sestavení antikolizního systému jsou potřeba tři základní moduly.

- mikrokontroler
- GPS modul
- vysílač a přijímač.

Na obrázku 11 je naznačeno propojení použitých prvků.



Obrázek 11: Schéma propojení modulů

### GPS modul

Jedná se o samostatný modul plně řešící problematiku GPS. Předávání GPS koordinát mikrokontroleru bude provedeno pomocí sériového rozhraní.

### Vysílač a přijímač

Jde o podsystém plně řešící komunikaci. Musí obsahovat komunikační linku a to opět sériové rozhraní.

## Mikrokontroler

Bude hlavním výpočetním prostředkem. Mezi nutné vlastnosti patří schopnost pracovat s čísly s desetinnou čárkou, komunikace mezi více zařízeními po sériových linkách a informovat o možném vzniku kolize.

### 6.1 Mikrokontroler

Je nutné ze stanovených předpokladů určit, který mikrokontroler je pro nasazení v antikolizním systému nejvhodnější. Některé podmínky jsou pro běh nutné, některé lze zmírnit.

Mikrokontroler musí být schopen komunikovat jak s GPS modulem, tak i s vysílačem. Výměna informací mezi nimi musí být naprosto nezávislá. Zařízení musí mít alespoň dvě sériové linky pro připojení k GPS modulu a rádiovému vysílači.

Výpočet kolizí v prostoru předpokládá práci s desetinnými čísly. V ideálním případě je procesor mikrokontroleru schopen takové čísla zpracovávat. Zařízení pracující s čísly s desetinnou čárkou je poměrně široká řada, ale většinou se jedná o signálové procesory. Samostatných mikrokontrolerů pracujících s desetinnými čísly již není mnoho a většina z nich postrádá větší počet komunikačních linek nebo nejsou příliš výkonné. Možné je sestavit vlastní mikrokontroler z procesoru umožňující práci v plovoucí řádové čárce, paměti a několika periférií, jako jsou například zmíněné komunikační linky. Návrh a osazení takového mikrokontroleru je ovšem komplikovaný. Jinou možností je vytvořit na jednoduché architektuře vlastní formát desetinných čísel a aritmetické operace na této architektuře nasimulovat. Každá operace s desetinným číslem bude zřejmě pomalejší, než běžná celočíselná, ale použitý procesor již bude schopen pracovat s novým číselným typem. Je tedy důležité zvolit vhodný kompromis mezi výkonem a snadností implementace.

V poslední řadě musí mít mikrokontroler prostředky, jak informovat o riziku vzniku kolize. Existuje několik možných přístupů od zvukové signalizace až po display zobrazující polohu objektu, se kterým objekt leží v kolizní dráze.

### 6.2 STM32 primer

Výběr mezi sestavováním vlastního mikrokontroleru nebo použitím některého z existujících byl určen dle vlastností existujících zařízení. Zvolený STM32 primer má několik komunikačních linek a display pro zobrazení informací [16].

Základní popis parametrů mikrokontroleru:

- pracovní frekvence 72 MHz
- 128 KB flash paměti pro aplikace
- 20 KB SRAM paměti
- 2 \* 12 bit A/D převodníky
- 2 komunikační linky SPI 18 Mbit/s
- 3 komunikační linky USART

- USB 2.0 rozhraní
- Display 128 \* 128 pixelů, 65536 barev
- akcelerometr
- rozhraní CAN

Uvedený seznam obsahuje pouze nejdůležitější vlastnosti.



Obrázek 12: STM32 Primer

Mikrokontroler je osazen 32-bitovým procesorem ARM Cortex™ M3, který nativně nepodporuje práci s desetinnými čísly. Pro určování kolizí tedy bude nutné vytvořit datový typ desetinných čísel a veškeré nutné aritmetické operace.

Běžným standardem desetinných čísel na počítačích je IEEE 754. Vzhledem k ustálenosti normy je použita také pro výpočty kolizí.

IEEE 754 definuje význam jednotlivých bitů v čísle a jejich celkový počet nutný pro uložení do paměti. Aritmetické operace již nejsou přesně definovány, pouze jejich výsledky musí být korektní. Norma navíc obsahuje množinu čísel, které mají v daném kontextu speciální význam a představují jisté výjimky v rámci všech aritmetických operací. Jedná se o určení hodnot  $+\infty$ ,  $-\infty$  a identifikaci nejmenšího kladného i záporného čísla. Standard určuje základní přesnost desetinného čísla uloženého na 32 bitech, dvojnásobnou přesnost používající 64 bitů a dvojitou-rozšířenou přesnost pro 79 a více bitů. Pro implementaci normy je vyžadována jen základní přesnost, ostatní jsou volitelné.

## 6.2.1 Standard IEEE 754

Pro potřeby antikolizního systému je použita pouze základní přesnost, tedy uložení čísla na 32 bitech. Číslo je reprezentováno v podobě:

$$N_{FP} = (-1)^s * 2^{\text{exp} - \text{bias}} * m \quad (46)$$

kde:

- $N_{FP}$  značí reprezentovanou numerickou hodnotu z podmnožiny racionálních čísel
- 2 je báze, někdy nazývaná radix. U IEEE 754 je to vždy hodnota 2
- exp je vždy kladná hodnota exponentu posunutého o hodnotu bias

- bias je hodnota, díky které je uložený exponent vždy kladný. Jeho hodnota se většinou volí dle vztahu  $bias = 2^{eb-1} - 1$ , kde eb je počet bitů vyhrazených pro exponent
- m je mantisa, pro IEEE 754 je vždy kladná
- s je znaménkový bit nabývající hodnotu 0 nebo 1

Implementace funkcí pro výpočet kolizí předpokládá existenci aritmetických operací součtu, rozdílu, násobení a dělení. Pro převod ze sférické do kartézské soustavy souřadnic je potřeba ještě funkcí sin a cos.

Výpočet základních aritmetických funkcí je vždy složen z porovnání exponentů jednotlivých operandů. Následuje posunutí mantisy tak, aby měly obě čísla stejný exponent. Poté se provede konkrétní aritmetická operace. Posledním krokem je zarovnání výsledku na normalizovaný tvar. Procesor ARM Cortex™ M3 sice nativně nepodporuje práci s desetinnými čísly, ale také není potřeba sestavovat jmenované funkce, protože jsou již součástí vývojového prostředí dodávaného k mikrokontroleru.

Obtížnější je výpočet goniometrických funkcí. Jako základ pro jejich vyhodnocení slouží již existující aritmetické operace. Funkce sinus je vypočtena podle taylorova rozvoje:

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} \dots \quad (47)$$

a kosinus:

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} \dots \quad (48)$$

Výpočet funkcí konverguje nejlépe na intervalu  $\langle 0; \frac{\pi}{4} \rangle$  a je tedy nutné argumenty upravit na uvedený rozsah. Již je nutné stanovit pouze podmínku, při které bude ukončeno řešení uvedených funkcí. Výpočet je prováděn v cyklu, kdy každá iterace zvyšuje přesnost výsledku. Běžně je vyhodnocování ukončeno, jakmile změna přičítaná nebo odečítaná k poslední hodnotě výpočtu je v absolutní hodnotě menší, než stanovená konstanta. Jestliže je číslo uloženo ve standardu IEEE 754, pak je možné, že absolutní hodnota velikosti změny bude stále větší, než požadovaná přesnost, ale výsledek funkce se již nebude měnit. Důvodem vzniklé situace je nízká přesnost čísla v použitém rozsahu. Cyklus je tedy možné ukončit již v případě, že dvě po sobě jdoucí hodnoty výsledku funkce jsou stejné. Experimentálně bylo zjištěno, že pro základní přesnost výpočtu nikdy neproběhne víc, než 5 iterací. Přesnost výpočtu je shodná, jako při výpočtu daných funkcí pomocí matematického koprocesoru.

Výpočet goniometrických funkcí je již také integrován ve vývojovém prostředí, ale jejich řešení je pro argumenty mezi  $\langle 0; \frac{\pi}{2} \rangle$  pomalejší.

## 6.2.2 Systém přerušení

Již během tvorby protokolu bylo naznačeno, že nebude možné celý systém implementovat jako jedinou funkci pracující v cyklu. Pro správnou činnost je potřeba jednou za určitý čas provést jistou operaci nebo pouze v jistých případech. Jedná se o převzetí informací od GPS přijímače nebo identifikaci času, kdy je nutné opět odeslat koordináty [16].

Prakticky pro každou událost je v mikrokontroleru definováno přerušení. Pro potřeby aplikace jsou nutné pouze dvě a to přerušení časovače a příchod signálu na USART 2, kde může být připojen GPS přijímač.

## 6.2.3 Použití sériových linek

Každou ze dvou USART linek je možné použít libovolným způsobem. Linka USART 1 lze použít pouze v režimu vysílače. Nastavit lze veškeré běžné parametry sériového rozhraní:

- baud rate – rychlost sériového rozhraní
- word length – délka slova
- stop bits – počet stop bitů
- parity
- hardware flow control – řízení přenosu dat po sériové lince
- mode
- clock
- CPOL, CPHA – nastavení platnosti dat
- last bit – nastavení významu posledního bitu

Jak již bylo zmíněno, linka USART 2 může být použita pro komunikaci s GPS modulem. Pro výměnu dat s vysílačem a přijímačem je zvolena jiná linka USART nebo eventuálně také rozhraní USB [16].

## 6.2.4 Display

Display je jednou z nejlepších možností, jak uživateli předat informace o hrozící kolizi. Obrazovka STM 32 Primer1 umožňuje zobrazit 128 na 128 pixelů a počet barev je 65536. Pro běžné potřeby jsou tyto rozměry i počet barev dostačující. Jistým omezením vůči zobrazovacímu subsystému je velikost paměti. Pro uložení všech bodů obrazovky by bylo potřeba 32 KB RAM paměti, kterou ovšem mikrokontroler k dispozici nemá. Je tedy možné, že v případě velkého množství kolizí bude obrazovka vlivem malé rychlosti vykreslování blikat.

## 6.3 GPS přijímač

Jediným úkolem přijímače je předat informace o poloze mikrokontroleru. Jedná se o naprosto běžný požadavek a prakticky všechny dostupné přístroje jej splňují. Dalším kritériem výběru může být

kvalita, cena modulu nebo komunikační rozhraní. Pro antikolizní systém byl zvolen GPS modul Garmin GPS 18 -5Hz. K jeho výběru vedla především možnost připojení pomocí sériové linky.

Po připojení je zařízení schopno předávat po sériové lince informace o své poloze pomocí standardu NMEA.



Obrázek 13: Garmin 18 -5Hz

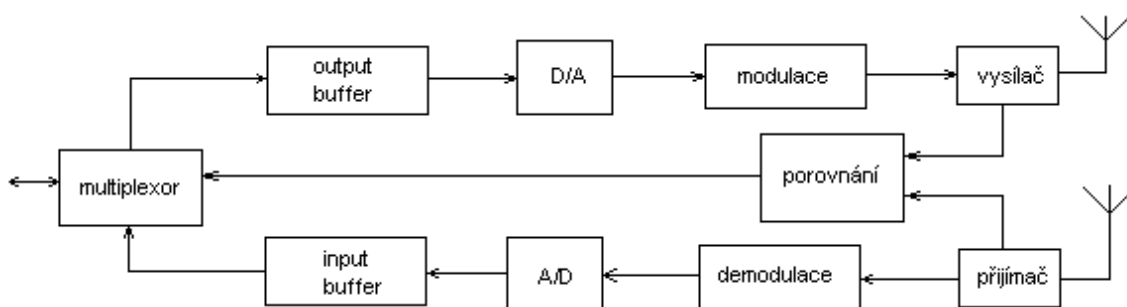
## 6.4 Vysílač a přijímač

Posledním nutným prvkem pro realizaci antikolizního systému je prostředek pro komunikaci s okolními moduly. Již během návrhu protokolu se objevily dva možné způsoby řešení některých problémů týkajících se funkce vysílače a přijímače. Nebyl nalezen žádný běžně dostupný modul, který by byl schopen předávat data jedním z uvedených způsobů a je tedy nutné navrhnout vlastní vysílač a přijímač.

Podsystem odesílání prostorových koordinátů není dokončen. Je proveden návrh i implementace komunikačního protokolu a analýza možných výsledných řešení. Jedním z důležitých úkolů dalšího vývoje je sestavení modulu.

### 6.4.1 Separované moduly

Prvním z možných řešení je vytvořit dvě do jisté míry nezávislé zařízení, které budou porovnávat své výstupy. V případě, že nastane neshoda bude generován signál pro mikrokontroler značící chybový stav. Obrázek 14. obsahuje schéma propojení základních funkčních bloků takového zařízení [14].

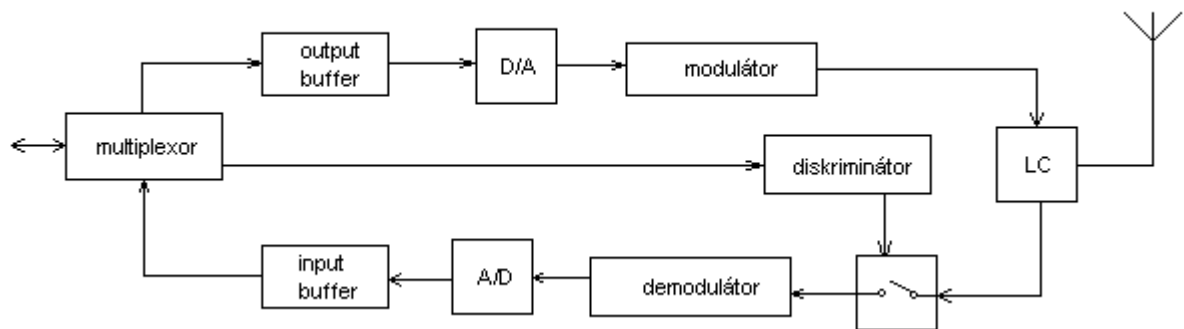


Obrázek 14: schéma separovaných modulů

### 6.4.2 Časový multiplex

Pro výslednou realizaci by bylo jednodušším řešením, kdyby existoval pouze jeden blok, který pouze vysílá nebo přijímá signál. Odpadá tím mnoho problémů spojených s rušením a nepřesnostmi,

ale je také možné, že dva právě odesílané signály se pro určitý signál cíle překryjí a nebude pro něj možné rozpoznat vzniklou kolizi. Na obrázku 15. je znázorněno schéma propojení základních funkčních bloků takového řešení [14].



Obrázek 15: schéma pro časový multiplex

## 6.5 Implementace

Pro vývoj byl použit software Ride 7. Jedná se o vývojové prostředí umožňující sestavovat programy pro procesory ARM a na nich založené mikrokontrolery v jazyce C. Tvorba programu je tedy velice podobná práci v libovolném jiném prostředí.

Platforma mikrokontroleru STM32 primer je limitována několika faktory a to především velikostí použitelné paměti. Zvolený prostředek má k dispozici 20 KB univerzální SRAM a 128 KB FLASH paměti pro programy, z čehož je díky použitému CircleOS operačnímu systému k dispozici 16 KB SRAM a 86 KB FLASH paměti pro vytvořené aplikace. Jistým omezením je i velikost kompilovaných objektů (všech souborů typu .o), kde velikost jednotlivých souborů nesmí přesáhnout 8 KB. Pro potřeby ladění je navíc výrazně omezena také velikost výsledné aplikace [16].

### 6.5.1 Jádro programu

Běžná grafická aplikace pro STM32 primer není prováděna pro jazyk C standardním způsobem, tedy spuštěním funkce `main()`. Zdrojový text aplikace tedy musí obsahovat použití knihovny pro mikrokontroler, název programu, inicializační a základní cyklicky prováděnou funkci :

```
/* knihovna mikrokontroleru */
#include "circle_api.h"

/* název aplikace - maximálně 8 znaků */
const char Application_Name[8+1] = {"aerolab"};
/* inicializační funkce */
enum MENU_code Application_Ini ( void )
{ }
```

```

/* řídicí funkce programu */
enum MENU_code Application_Handler ( void )
{
    return MENU_Quit();
}

```

## Použití knihoven

Do programu je možné zahrnout mnoho různých knihoven. Povinná je pouze jedna a to právě pro některý přípustný typ mikrokontroleru, pro běžnou aplikaci na STM32 prumeru je to soubor `circle_api.h`. V případě použití nějakého jiného rozhraní je nutné připojit k projektu i zdrojový text. Rozhraní mikrokontroleru je uváděno, stejně jako vlastní nebo jiné nestandardní zdrojové soubory, mezi uvozovky. Pro veškeré použité zdrojové texty platí již zmíněné omezení.

## Název aplikace

Každý program by měl mít přiděleno jméno, aby bylo možné jej pomocí operačního systému identifikovat a spustit. Název by měl být unikátní v rámci názvů programů na jednom mikrokontroleru. Název je vhodné skládat pouze ze znaků a číslic.

## Inicializační funkce

Je spuštěna pouze jednou a to při startu aplikace. Měla by postupně provést základní nastavení všech vlastností mikrokontroleru, které budou následně použity. Jedná se například o úpravu časování, nastavení a aktivaci komunikačních rozhraní a přiřazení známých hodnot pro proměnné. V případě úspěšného provedení by měla funkce vracet `MENU_CONTINUE_COMMAND`.

Pro potřeby antikolizního systému je zde provedena konfigurace linek USART, úprava časovače a určení počáteční polohy objektu.

## Řídicí funkce

Jedná se o jistou obdobu funkce `main()` pro běžný program v jazyce C. Pouze `Application_Handler` je operačním systémem cyklicky volána, dokud funkce vrací `MENU_CONTINUE`. Rozdíl mezi nimi je pouze v tom, že řídicí funkce pro aplikaci na STM32 prumer je volána v cyklu a proto by neměla být sestavena jako klasická řídicí smyčka konzolové aplikace v jazyce C, kdy po jejím konci také končí celý program. Uvnitř funkce by měly být řešeny aktuální změny a části výpočtů. V případě, že některá informace ještě nejsou k dispozici je vhodnější výpočet neprovádět a v příští iteraci funkce znovu otestovat, jestli již jsou k dispozici potřebná data. Jestliže je zapotřebí již programu ukončit, je zvolena jako návratová hodnota `MENU_LEAVE`.

Většina práce celého systému je prováděna během této funkce. Jednou za sekundu je smazán a překreslen display, jsou prováděny přepočty GPS koordinátů, řešeny kolize a dle protokolu odesílány i přijímány prostorové koordináty.

## 6.5.2 Moduly programu

Aplikace je rozdělena do několika modulů podle problematiky, kterou řeší. Rozdělení do jednotlivých funkčních celků je výhodné z hlediska logického rozdělení na jednotlivé problematiky, ale také nutné, protože je omezena velikost každého z modulů a také lze díky tomu některé moduly testovat a ladit naprosto nezávisle mimo prostředí Ride 7.

### Kolize

Výpočet kolizí je rozdělen do souboru `collision.h`, kde jsou uloženy prototypy funkcí a souboru `collision.c` kde jsou jednotlivé operace implementovány. Modul obsahuje základní operace s vektory v prostoru, na kterých je založen výpočet kolizí dvou čtyřstěnnů, jimiž je aproximována poloha dvou objektů v prostoru. Z důvodu zvýšení rychlosti jsou zde také funkce sinus a kosinus.

### Display

Pro zjednodušení práce se zjištěním času aktualizace a pro překreslování obrazovky jsou sestaveny soubory `display.h`, který obsahuje prototypy a `display.c`, kde jsou definice použitých funkcí.

### Komunikační rozhraní

Další specifickou oblastí jsou sériové linky. Pro potřeby nastavení základních vlastností, přijímání a odesílání dat, ustanovení přerušení a ošetření chybových stavů jsou vytvořeny moduly `usart.h` a `usart.c`.

### Výměna zpráv

Soubory `protocol.h` a `protocol.c` řeší problematiku komunikace s ostatními moduly. Je zde implementován navržený protokol.

### Nastavení vlastností

Většina základních numerických konstant, které mohou ovlivnit běh programu se nachází v souboru `setup.h`. Jedná se především o parametry výpočtu kolizí, ale také o některé ladící informace.

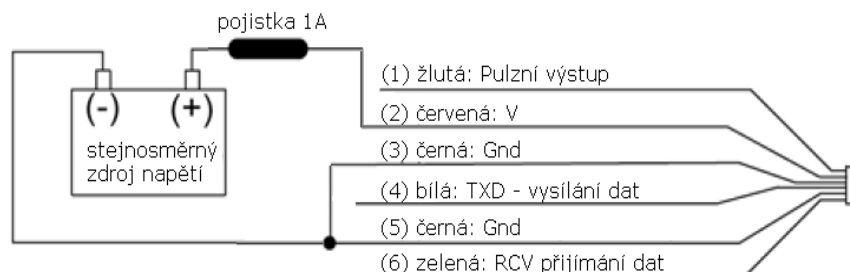
### Aplikace

Veškeré použité moduly zastřešuje `application.c`, který obsahuje jádro programu.

## 6.6 Hardware

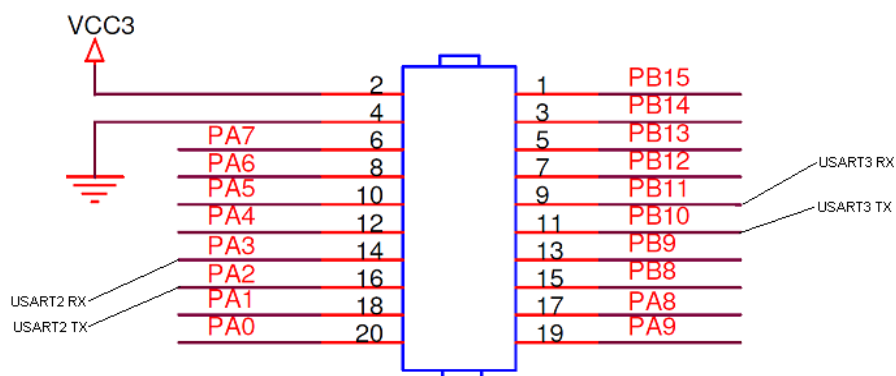
K sestavení projektu je zapotřebí STM32 prumer, GPS Garmin 18 -5Hz a zdroj stejnosměrného napětí 4 až 5.5V. Jak již bylo zmíněno dříve, GPS přijímač lze připojit k sériovým linkám USART.

Pak napětí pro GPS přijímač a datové vodiče budou připojeny podle následujícího schématu na obrázku 16.



Obrázek 16: schéma významu vodičů

Dle schématu připojení komunikačních linek k STM32 prumeru lze vyvést více typů rozhraní, ale pro potřeby antokolizního systému jsou důležité USART2 a USART3. Protože pouze druhá a třetí linka může vysílat i přijímat data. Na obrázku 17. jsou schematicky vyznačeny kontakty RX a TX obou rozhraní, které se také nacházejí na desce plošného spoje zařízení.



Obrázek 17: Vývody RX a TX pro rozhraní USART 2 a USART 3

# Kapitola 7

## Návrh dalšího vývoje projektu

### Zpracování vysílače a přijímače

Bez modulu pro výměnu zpráv systém není kompletní. Je nutné z navržených schémat vybrat jeden koncept, podle kterého by měl být komunikační prvek sestrojen. Jedná se o výběr metody vysílání a pracovní frekvence, typu kódování či modulace a následnou praktickou realizaci systému.

### Nastavení pracovních konstant dle prostředí

Dráha pohybu je v použitém modelu aproximována tělesem, které s jistou pravděpodobností ohraničuje oblast, kde se objekt může vyskytovat. Je velice důležité nastavit konstanty definující rozměry tělesa tak, aby byl pilot vždy varován v dostatečném předstihu o hrozící kolizi, ale zároveň aby nebyl rušen v případě, že hrozící kolize je velice vzdálená a je velmi pravděpodobné, že jedno z těles změní směr pohybu a již nebude ležet na kolizní dráze. Stejným způsobem je potřeba určit, od jaké vzdálenosti mezi objekty je již nutné začít provádět výpočty kolizí.

### Důkladné odladění systému

Přestože bylo při implementaci jednotlivých modulů celého systému prováděno testování, je nutné celý projekt odladit při reálném použití, kdy se mohou projevit některé skryté chyby. Sníží se také pravděpodobnost, že zařízení, které bylo testováno pouze v umělých podmínkách, bude nespolehlivé nebo nebude mít dostatečný výkon. Větší část algoritmů byla laděna pouze v situaci, kdy nebylo zařízení zatíženo velkým množstvím výpočtů kolizí a komunikačních signálů.

# Kapitola 8

## Závěr

S rostoucími požadavky na bezpečnost se zvyšují nároky na zlepšení kvality a spolehlivosti stávajících antikolizních systémů nebo na zavedení nových. Na trhu existují výrobci, kteří jsou schopni vytvořit takové zařízení. Právě jedno z nich posloužilo jako vzor funkcionality, jakou by měl výsledný systém mít.

Cílem této práce tedy bylo navrhnout a sestrojít antikolizní systém, který by mohl být plnohodnotně používán v malém letadle tak, aby každý stroj vybavený takovým zařízením byl schopen odhalit blížící se kolizi s jiným strojem nesoucím stejné zařízení. Zařízení není již z principu své koncepce schopno odhalit možnou kolizi s okolním prostředím.

Dle zadání práce zařízení pro určení své polohy využívá GPS systém. Byl navržen a realizován způsob, jakým se prostorové koordináty transformují z podoby poskytnuté GPS modulem až k výslednému formátu, který je vhodný pro výpočet kolizí.

Pro potřeby stanovení, zda leží objekty na drahách, kde hrozí srážka bylo vytvořeno několik modelů určení kolize. Postupně byly prozkoumány běžně používané metody pro určení kolizí těles a posléze byly vytvořeny algoritmy predikce nárazu v závislosti na přesnosti polohy a očekávané odchylce ve směru pohybu. Výsledná metoda je kompromisem mezi spolehlivostí určení hrozících kolizí a náročností výpočtu. Vybraný algoritmus je upraven pro potřeby určení hrozící srážky malých letadel, optimalizován a implementován.

Posledním plně zpracovaným problémem byl návrh a implementace komunikačního protokolu pro předávání informací o poloze, rychlosti a směru pohybu. Jako koncept posloužily některé standardní protokoly. Jeho konečná podoba je však dána použitým komunikačním médii a množstvím přenášených dat.

Dalším nutným krokem pro plnou funkčnost systému je dokončení modulu pro odesílání a přijímání koordinátů. Nicméně po dokončení subsystému výměny dat by se systém mohl začít zkušebně používat a upravovat podle přesných požadavků daných konkrétním prostředím.

# Literatura

- [1] Flarm: Flarm.com. 2008,[Online; navštíveno 2. 12. 2008].  
URL <http://www.flarm.com>
- [2] Wikipedia: Global Position System – Wikipedia, The Free Encyklopedia. 2008,  
[Online; navštíveno 11. 12. 2008].  
URL [http://cs.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](http://cs.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)
- [3] Wikipedie: Globální družicové polohové systémy – Wikipedie: Otevřená encyklopedie. 2008,  
[Online; navštíveno 10. 12. 2008].  
URL [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Globální\\_družicové\\_polohové\\_systémy](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Globální_družicové_polohové_systémy)
- [4] Czespace: Internetové stránky České kosmické kanceláře. 2008,  
[Online; navštíveno 27. 11. 2008].  
URL <http://www.czechspace.cz/cs/galileo/aktuality-GPS-Glonass/GPS>
- [5] Abclinuxu: GPS a komunikační protokol nmea. 2008,  
[Online; navštíveno 16. 12. 2008].  
URL  
<http://www.abclinuxu.cz/clanky/ruzne/gps-a-komunikacni-protokol-nmea-3-dekodovani-dat>
- [6] Wikipedie: Diferenciální GPS – Wikipedie:Otevřená encyklopedie. 2008,  
[Online; navštíveno 20. 12. 2008].  
URL [http://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenciální\\_GPS.htm](http://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenciální_GPS.htm)
- [7] NMEA: Internetové stránky NMEA  
[Online; navštíveno 10. 11. 2008].  
ULR <http://www.nmea.org>
- [8] CBmonitor: Internetové stránky CB MONITOR. 2008,  
[Online; navštíveno 11. 12. 2008].  
URL <http://cb.cwa1.net/>
- [9] Hans Jochen Bartsch: matematické vzorce, třetí vydání, 2002.
- [10] Škrášek, J. - Tichý, Z.Základy aplikované matematiky I, druhé vydání, 1989.
- [11] Rektorys, K.: Přehled užití matematiky II, druhé vydání 1995.
- [12] Mastný. E.: Úvod do analytické geometrie lineárních útvarů a kuželoseček, 1953.
- [13] Peschl, E: Analytická geometrie a lineární algebra, 1971.
- [14] Nováček, Z: Elektromagnetické vlny, antény a vedení. FEKT VUT v Brně, Brno, 2005.
- [15] Černohorský, D. - Nováček, Z. Antény a šíření elektromagnetických vln. FEKT VUT v Brně, Brno, 1989.
- [16] STM32: STM32 primer. 2009,  
[Online; navštíveno 11. 4. 2009].  
URL <http://www.stm32circle.com>

# Seznam příloh

Příloha A. Uživatelský manuál

Příloha B. Obsah přiloženého CD

# Příloha A

## Uživatelský manuál

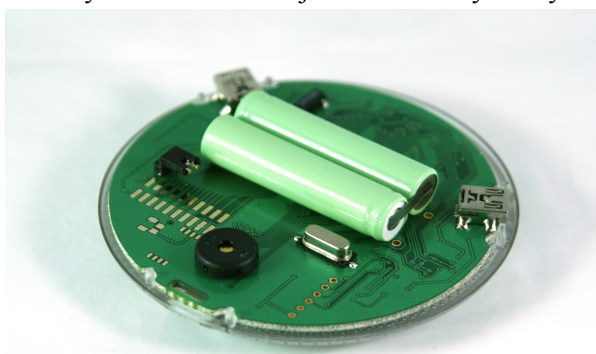
Tento uživatelský manuál se snaží představit základní práci se systémem a jeho možnosti. Popis jednotlivých činností je dodán ke konkrétním problémům.

### A.1 STM32 primer

Pro oživení mikrokontroleru je potřeba provést několik kroků.

- Připojit baterii
- Nabít baterii

Mikrokontroler je standardně dodáván s odpojenou baterií a je tedy nutné ji připojit. Nejprve je nutné sejmout plastový kryt zařízení a na spodní straně plošného spoje je propojovací můstek, s jehož pomocí se propojí volné kontakty. Na obrázku 18. je znázorněn výsledný stav.



Obrázek 18: Propojovací můstek

Jakmile je baterie připojena, je možné přístroj nabít. Pro nabíjení akumulátorků a komunikaci je k zařízení dodáván propojovací USB kabel. Pro nabíjení je potřeba kabel zapojit do USB portu počítače a druhý konec k USB kabelu připojit ke konektoru mikrokontroleru, nad kterým je v plastovém krytu vylišován nápis STM32.

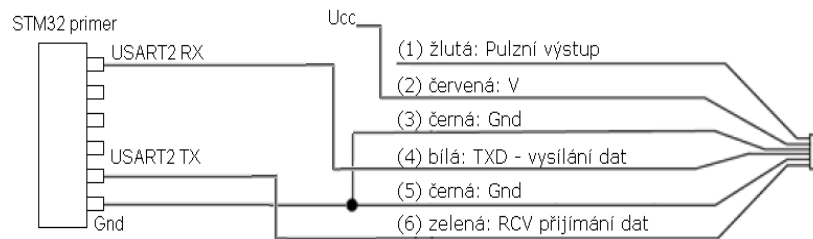
### A.2 Instalace vývojového prostředí

K novému zařízení je dodáváno CD s vývojovým prostředím RIDE 7 a ovladačem pro komunikaci mezi počítačem a mikrokontrolerem.

Vývojové prostředí je možné nainstalovat v prostředí MS Windows. Veškeré potřebné aplikace i ovladače jsou na příloženém CD v adresáři `tools`. Instalaci není vhodné provádět, pokud je mikrokontroler připojen k počítači.

## A.3 Propojení komponent

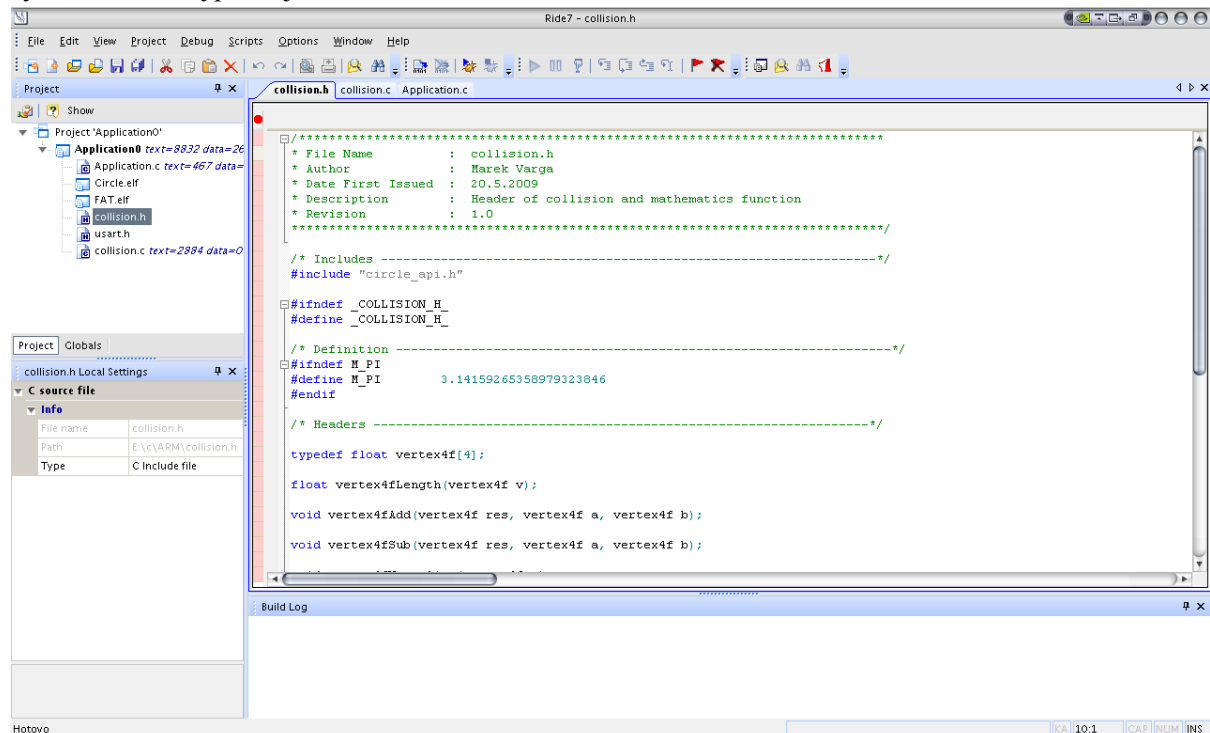
Mikrokontroler a GPS přijímač je nutné propojit vodiči a k zařízení GPS je nutné přivést napájecí napětí. Obrázek 19 znázorňuje připojení vodičů mezi GPS přijímačem a STM32 pramerem.



Obrázek 19: Propojení GPS vysílače a STM32 primeru

## A.4 Práce v prostředí

Vývojový software je svým chováním běžný vývojový produkt. Otevřený projekt antikolizního systému může vypadat jak na obrázku 20.



Každý projekt je uložen jako soubor typu `.rprj` v kořenovém adresáři projektu, který mimo jiné obsahuje zdrojové kódy projektu a dva význačné podadresáře a to `objdebug` a `objrelease`.

Adresář `objdebug` obsahuje zkompileovaný projekt s ladícími informacemi, v adresáři `objrelease` je uložen projekt bez těchto informací.

Pokud je potřeba nahrát projekt do mikrokontroleru, je nutné připojit USB kabel k počítači a na straně mikrokontroleru je nutné jej zapojit do USB konektoru označeného na krytu jako `DEBUG`. Následně je nutné mikrokontroler zapnout a v podadresáři `objdebug` nebo `objrelease` spustit dávkový soubor `add_to_circle.bat`, který aplikaci okopíruje do mikrokontroleru.

## A.5 Ovládání systému

Mikrokontroler se po zapnutí zobrazí pouze základní obrazovku. Pomocí tlačítka lze vyvolat menu, ve kterém je možné pomocí natáčení mikrokontroleru a tlačítka možné pohybovat se v menu. Veškeré uživatelem přidané programy jsou v podmenu `Applic`.

Antikolizní systém po svém spuštění pracuje tak dlouho, dokud není tlačítkem ukončena jeho činnost. Systém je sestaven v několika podobách, které jsou pojmenovány `aerox`, kde písmeno `x` značí verzi systému.

# Příloha B

## Obsah přiloženého CD

Adresářová struktura přiloženého datového média:

- ◆ `doc` – dokumentace k projektu
- ◆ `program` – hlavní složka programové realizace
  - `release` – zkompilovaná verze systému
  - `sources` – zdrojové kódy systému
  - `support` – zdrojové kódy částí systému upravené pro testování
- ◆ `thesis` – text diplomové práce
- ◆ `tools` – vývojové prostředky pro kompilaci/vývoj projektu