



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

INTELIGENTNÍ AUTOPILOT ZALOŽENÝ NA AGENTNĚ ORIENTOVANÉM PROGRAMOVÁNÍ

INTELLIGENT AUTOPILOT BASED ON AGENT-ORIENTED PROGRAMMING

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT

TERM PROJECT

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PATRIK ČIGÁŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. FRANTIŠEK ZBOŘIL, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce



19127

Student: **Čigáš Patrik, Bc.**
Program: Informační technologie Obor: Inteligentní systémy
Název: **Inteligentní autopilot založený na agentně orientovaném programování**
Intelligent Autopilot Based on Agent-Oriented Programming
Kategorie: Umělá inteligence

Zadání:

1. Nastudujte problematiku řízení bojového letadla a současný stav v oblasti simulací leteckých bojových misí.
2. Identifikujte události a procesy, které nastávají a jsou prováděny během bojové operace, kdy má dojít k souboji jeden na jednoho, nebo letek o více letadlech.
3. Vytvořte model procesů, které navzájem souvisí při provádění manévrů, podmínky jejich realizace a podmínky, kdy má dojít k přehodnocení postupů.
4. Realizujte agenta nebo agenty, kteří jsou schopni tyto procesy realizovat.
5. Vytvořte jednoduchý simulátor, nebo upravte vhodně existující, a v něm ověřte chování navržených agentů při leteckých soubojích letadel jeden na jednoho.
6. Vytvořte poster formátu A1, na kterém budou názorně demonstrovány podstatné výsledky dosažené během řešení projektu.

Literatura:

- Wooldridge, M.: An Introduction to MultiAgent Systems, 2nd Edition, Willey, 2009
- Basic Fighter Maneuvering (BFM), NAS Corpus Christi, Texas, (online)

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- První dva body zadání

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Vedoucí práce: **Zbořil František, doc. Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2018

Datum odevzdání: 22. května 2019

Datum schválení: 1. listopadu 2018

Abstrakt

Cielom tejto práce je zautomatizovať pilotovanie bojovej stíhačky počas vzdušných súbojov. Táto práca analyzuje bojové manévry počas vzdušných súbojov. Na základe tejto analýzy sú následne zostrojený agentný piloti v jazyku Jason, ktorý sú schopný viesť súboje jednotlivcov, ale aj letiek. Táto práca sa zaoberá najmä komunikáciou agentov v letkách a ich koordináciu pri využívaní letkových taktík. Výsledný agent môže byť použitý ako pilot za účelom reálnych vzdušných súbojov, ako protivník pri cvičných simuláciách alebo rôznych počítačových hrách.

Abstract

The aim of this thesis is to automate flying fighter jets during dogfights. This thesis analyzes fighter maneuvering during dogfights. Agents based pilot is programmed in Jason, based on maneuvering analysis. These agents are capable of performing one-on-one combat or squadron-on-squadron combat. Main part of this thesis is communication of the agents and their coordination in performing squadron tactics. Final agent can be used as pilot in actual dogfights or as an enemy in training simulations or in various video games.

Klíčové slová

Agentne orientované programovanie, Multiagentné systémy, Jason, Letecké súboje, Základné manévrovanie stíhačiek

Keywords

Agent oriented programming, Multiagent systems, Jason, Dogfights, Basic fighter maneuvering

Citácia

ČIGÁŠ, Patrik. *Inteligentní autopilot založený na agentně orientovaném programování*. Brno, 2018. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. František Zbořil, Ph.D.

Inteligentní autopilot založený na agentně orientovaném programování

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením pána docenta Františka Zbořila. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Patrik Čigáš
22. mája 2019

Podakovanie

Rád by som sa poďakoval všetkým, ktorý mi pomáhali pri písaní tejto práce, najmä pánovi doc. Ing Františkovi Zbořilovi, Ph.D. za poskytnuté konzultácie a výborné vedenie diplomovej práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Agentne orientované programovanie	4
2.1	Multiagentný systém	5
2.2	BDI model	5
2.2.1	Modality BDI modelu	6
2.2.2	Abstraktná architektúra BDI modelu	7
2.2.3	Agentspeak(L)	8
3	Bojové taktiky a manévry	10
3.1	Základné pojmy a geometrie	10
3.2	Zbraňové systémy	16
3.3	Bojové taktiky pri súboji jeden na jedného	17
3.3.1	Vysoké Jojo	18
3.3.2	Nízke Jojo	18
3.3.3	Ploché nožnice	19
3.3.4	Vertikálne nožnice	19
4	Súboje letiek	21
4.1	Letové formácie	21
4.1.1	Bojové krídlo	22
4.1.2	Dvojitý útok	23
4.1.3	Loose deuce	24
4.2	Bojové manévry	25
4.2.1	Zátvorka (Bracket)	25
4.2.2	Zátvorka letky	26
4.2.3	Sendvič	28
4.2.4	Defenzívne rozdelenie	28
4.2.5	Polovičné rozdelenie	28
4.2.6	Thatchovo pretkávanie	29
5	Implementácia	32
5.1	Použité nástroje	32
5.2	Agentný systém	33
5.3	Tímový agent	34
5.3.1	Rozhodovanie agenta	34
5.3.2	Implementácia taktík	34

6 Závěr	40
Literatúra	41
Prílohy	43
A Obsah priloženého CD	44
B Manuál	45

Kapitola 1

Úvod

Letecké boje tvoria dôležitú strategickú úlohu v modernom vojenskom svete a v minulosti z veľkej časti ovplyvňovali vývoj oboch Svetových vojen. V dnešnej dobe sa však snažíme zamedziť stratám na ľudských životoch, a preto sa snažíme čo najviac činností zautomatizovať. Táto automatizácia sa dotkla aj letectva.

Autopilot v komerčnej oblasti letectva bol používaný už od dvadsiatych rokov dvadsiateho storočia. Tento autopilot zvládol iba udržiavať výšku a smer letu. Moderný autopilot už dokáže aj sám meniť letovú hladinu a pri ideálnych podmienkach, dokonca aj pristáť. Dokáže už riadiť takmer celý letový proces okrem vzlietnutia a práce s podvozkom.

Čo sa týka armádneho letectva, tam je situácia odlišná. Veľká variabilita a množstvo manévrov používaných pri leteckých súbojoch sťažujú výrobu tak rozsiahleho autopilota, a preto je v nich stále potrebné ľudské riadenie. Jeden zo systémov automatického riadenia lietadla v armáde sú diaľkovo ovládané lietadlá, takzvané drony, ktoré sa používajú napríklad na špionáž nebezpečných oblastí.

Lietadlá a letecké súboje sa nevyskytujú iba v reálnom živote, ale aj v oblasti simulácií a počítačových hier. V tejto oblasti sú autopiloty viac rozšírené a líšia sa aj svojou inteligenciou.

Vytvorenie inteligentného autopilota, ktorý dokáže autonómne vykonávať letecké súboje je aj cieľom tejto práce. Tento autopilot bude vytvorený pomocou agentne orientovaného programovania, ktoré je zdrojom inteligencie autopilota. Viac o tomto štýle programovania sa dá dočítať v kapitole 2. Pre vytvorenie takéhoto agenta je nutné poznať aj pojmy a manévry používané v letectve. Dôležité sú taktiež taktiky používané pri leteckých súbojoch. Všetky tri časti sú popísané v kapitole 3. Ďalšiu dôležitú časť pre simuláciu leteckých súbojov tvoria súboje letiek, a to najmä používané doktríny a taktiky. Tie sú popísané v kapitole 4.

Posledná kapitola číslo 5 sa zaoberá implementáciou prostredia a lietadiel založených na agentnom programovaní a popisuje, ako sú jednotliví agenti naimplementovaný. Ďalej sa táto kapitola zaoberá porovnávaním súbojov, v ktorých sa používajú taktiky jeden na jedného a taktiky súboja letiek.

Kapitola 2

Agentne orientované programovanie

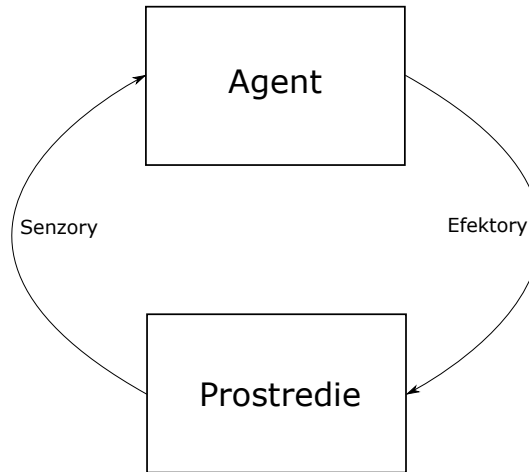
Aby sme porozumeli pojmu agentné programovanie musíme si najskôr určiť, čo je to agent. Aj keď neexistuje jednotne uznávaná definícia agenta, táto práca sa riadi definíciou pánov Woolridge-a a Jennings-a [16]: „Agent je počítačový systém umiestnený do nejakého prostredia, a je schopný v tomto prostredí vykonávať akcie, ktoré mu pomáhajú dosiahnuť jeho cieľ“. Takýto agent musí dokázať vnímať svoje okolie, čiže prostredie, v ktorom sa nachádza. Na vnímanie agentovi slúžia rôzne senzory. Agent musí byť schopný zároveň na toto prostredie aj vplývať, na čo mu slúžia efekторы. Abstraktný pohľad na takýto systém je možné vidieť na obrázku 2.1.

Spomínaná definícia agenta je jednoduchá, ale na druhú stranu aj málo špecifická, preto sa zaviedol aj pojem agentnosť [16]. Poznáme dva druhy agentnosti: **slabú agentnosť** a **silnú agentnosť**. Pre splnenie slabej agentnosti musí byť systém:

- **Autonómny** - agent koná bez priameho zásahu od človeka alebo iného systému a agent má kontrolu nad svojimi činmi a svojim vnútorným stavom.
- **Reaktívny** - agent musí pozorovať svoje prostredie a včasne reagovať na zmeny, ktoré v prostredí nastanú.
- **Proaktívny** - agent je schopný prevziať iniciatívu a sám ovplyvňovať prostredie za účelom splnenia svojich cieľov.
- **Má sociálne schopnosti** - agent je schopný jednať s inými agentmi (ľuďmi) pomocou určitého jazyka.

Jednoduchým príkladom slabých agentov sú programy bežiacie na pozadí v operačných systémoch (tzv. daemony).

Vlastnosti silnej agentnosti zahŕňajú všetky vlastnosti slabej agentnosti doplnené o pár ďalších vlastností. Napríklad podľa pánov Franklin-a a Graesser-a [7] sú ďalšie vlastnosti časová spojitosť, mobilita, schopnosť učenia sa a charakter. Iní agentnosť rozšírili napríklad pridaním mentálnych stavov [13] ako sú napríklad úmysly [6], predstavy a prania [10]. Agentnosť môže byť ale taktiež rozšírená o emócie [1], tak aby agenti pôsobili ako postavy, ktoré modelujú.



Obr. 2.1: Pohľad na agentný systém

2.1 Multiagentný systém

Už sme si ozrejmili, čo je to agent a agentný systém, avšak v reálnom živote sa málokedy vyskytuje systém, v ktorom by bol iba jeden agent. Väčšinou sa v systémoch nachádza väčšie množstvo rôznych agentov. Takýto systém sa nazýva multiagentný [15]. Štruktúru multiagentného systému je možné vidieť na obrázku 2.2. Agenti v takomto systéme môžu medzi sebou komunikovať a môžu sa navzájom ovplyvňovať prostredníctvom prostredia.

Väčšinou žiadny z týchto agentov nemá plnú kontrolu nad prostredím, má iba schopnosť ovplyvniť určitú časť prostredia. Pri čiastočnom ovplyvňovaní môžu dvaja agenti ovplyvňovať rovnakú časť prostredia a celkový stav danej časti prostredia potom závisí na kombinácii akcií oboch agentov. V prípade spoločného ovplyvňovania prostredia by mali všetci agenti očakávať, že prostredie neovplyvňujú sami a mali by svoje rozhodovanie prispôbiť tomuto poznatku. Takéto rozhodovanie skúma napríklad teória hier [14], ktorá je matematickým modelom rozhodovania racionálnych jedincov a rozšírila sa aj do modelovania interakcií agentov v multiagentných systémoch. Ďalší rozhodovací model, ktorý vychádza z teórie o ľudskom uvažovaní je BDI (*Belief-Desire-Intention*) model a BDI logika [8, 11].

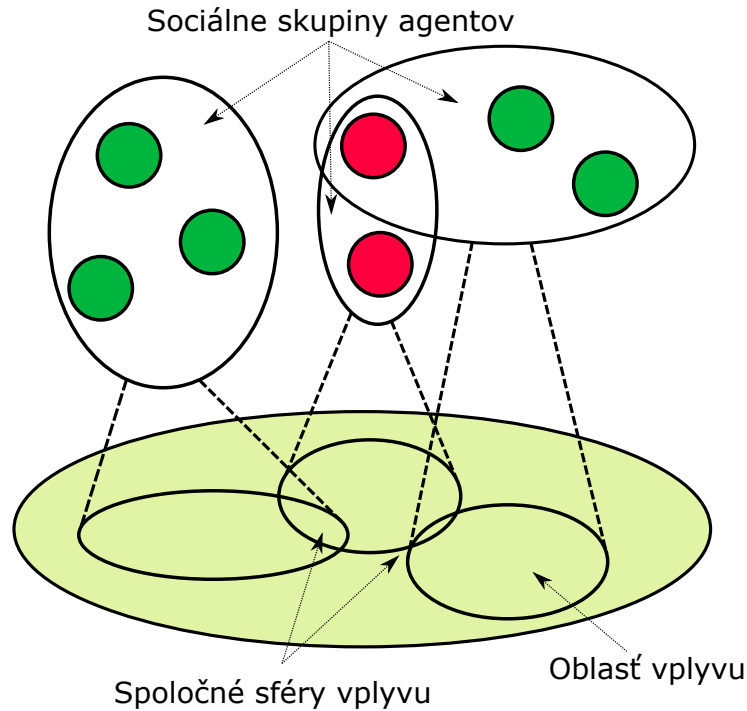
2.2 BDI model

Ako už bolo spomenuté, BDI model vychádza z výskumu ľudského uvažovania, ktorý bol vykonaný pánom Michaelom Bratmanom [3]. Táto forma modelovania agentných a multiagentných systémov sa dostala do popredia najmä vďaka vysokej miere výskumu BDI modelu a jeho zaxiomatizovanie [10, 6], a tým aj začlenenie do formálnej logiky.

Možnosť axiomatizovania BDI (*Belief-Desire-Intention*) modelu je založená najmä na fakte, že tento model pozostáva z troch množín a pre zaxiomatizovanie stačí formálne popísať vzťahy medzi týmito množinami.

Prvá množina je množina *Belief* - *predstavy* a značí agentove predstavy o svete okolo neho. Tieto predstavy môže agent získať zo svojich vnemov, ale môže si ich aj odvodiť už z jeho aktuálnych predstáv. Aj keď táto množina obsahuje model okolia a informácie o agentoch v okolí, nie všetky predstavy musia byť pravdivé.

Ďalšia množina je množina *Desire* - *priania* a značí množinu cieľov, ktoré agent chce dosiahnuť. Agent môže mať viac prání, pričom jednotlivé pránia si môžu aj navzájom



Obr. 2.2: Štruktúra multiagentného systému

odporovať. Ak sa agent snaží nejaké pranie splniť, toto pranie sa nazýva cieľ. Množina cieľov však už nesmie obsahovať prania, ktoré by si navzájom odporovali.

Posledná množina je množina *Intention* - *zámary*, ktorá značí množinu plánov a akcií, ktoré agent môže vykonať, aby dokázal dosiahnuť pranie. Nie všetky plány sú ale splniteľné v jednej akcii agenta, a preto sa plány môžu skladať ešte z pod-plánov. Plán, ktorý sa agent rozhodol vykonávať sa nazýva cieľ.

2.2.1 Modalita BDI modelu

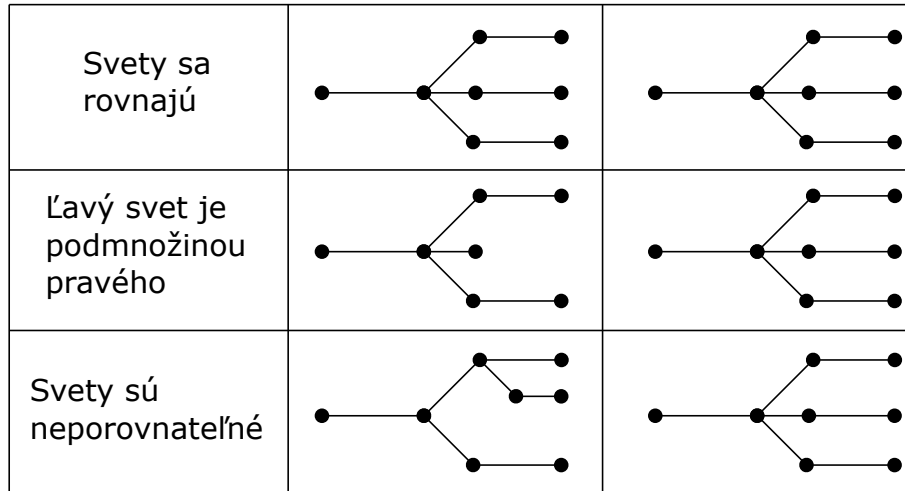
Poznáme už BDI model a jeho množiny, ale nepoznáme vzťahy medzi nimi. Aby sme boli schopný popísať vzťahy medzi množinami, musíme si najprv určiť, ako jednotlivé množiny vyzerajú. Možná reprezentácia množín môžu byť takzvané dostupné svety [10, 17], ktoré sú stromy vetviace sa v čase a každá z množín *Belief*, *Desire* a *Intention* je množina dostupných svetov. Medzi týmito množinami dokážeme definovať množinové operácie na rovnosť a podmnožinu. Zobrazenie takýchto svetov a relácií medzi nimi je možné vidieť na obrázku 2.3. Zohľadnením týchto vzťahov nám vznikli tri interpretácie BDI logiky, takzvané realizmy: *silný realizmus*, *realizmus* a *slabý realizmus*.

Silný realizmus axiomatizovaný pánmi Rao a Georgeff [10]. Tento realizmus sa dá vyložiť tak, že ak agent má zámer niečo spraviť, tak potom je to aj jeho pranie. A ak si agent niečo praje, tak potom verí, že jeho pranie je dosiahnuteľné [17]. Matematicky zapísané platí vzťah:

$$Belief \subseteq Desire \subseteq Intention$$

alebo

$$Intention \rightarrow Desire \wedge Desire \rightarrow Belief$$



Obr. 2.3: Zobrazenie množiny dostupných svetov a vzťahov medzi nimi

Realizmus bol axiomatizovaný pánmi Cohen a Lavesque [6] a títo páni majú opačný názor na vzťahy množín. Dá sa opísať tak, že ak agent verí, že je niečo pravdivé, potom si to aj praje. Ak má agent nejaké pranie, tak potom je to pranie aj jeho zámerom [17]. Matematicky zapísané platí vzťah:

$$Intention \subseteq Desire \subseteq Belief$$

alebo

$$Belief \rightarrow Desire \wedge Desire \rightarrow Intention$$

Slabý realizmus je stredná cesta medzi silným realizmom a realizmom. Pri slabom realizme platí, že agent si nepraje nič, čo je neuskutočniteľné a nemá zámer dosiahnuť niečo, čo si nepraje, respektíve o čom vie, že je neuskutočniteľné [17]. Matematicky sa to dá zapísať nasledovne:

$$Intention \cap Desire \neq \emptyset \wedge Belief \cap Desire \neq \emptyset \wedge Belief \cap Intention \neq \emptyset$$

alebo

$$Intention f \rightarrow \neg Desire \neg f \wedge Desire f \rightarrow \neg Belief \neg f \wedge Intention f \rightarrow \neg Belief \neg f$$

2.2.2 Abstraktná architektúra BDI modelu

Systém založený na BDI logike doplnenej o axiomy je postačujúci model, ale v praxi by sa dal jedine s pomocou softvéru dokazujúceho teorémy a takýto model by nebol dostatočne rýchly a interaktívny. Z tohto dôvodu si množiny *Belief*, *Desire* a *Intention* nahradíme dynamickými dátovými štruktúrami a pridáme front udalosti. Nad týmito štruktúrami dokážeme zostrojiť abstraktný výpočetný model tak, ako ho popísali páni Rao a Georgeff [11]. Popísaný algoritmus výpočtu je nasledovný:

```

inicializacia_stavu();
while(True):
    možnosti := generuj_možnosti(front_udalosti);
    prania := zvaž_možnosti(možnosti);

```

```

zámery := prepočítaj_zámery(priania);
vykonaj_udalosť(zámery);
získaj_nové_vnemy();
odstráň_dosiahnuté_stavy();
odstráň_nedosiahnuteľné_stavy();
end;

```

V tomto algoritme sa na začiatku každého výpočetného cyklu vygenerujú možnosti akcií, ktoré agent môže vykonať. Potom agent posúdi, ktoré možnosti mu pomôžu v dosiahnutí jeho cieľov, a tým vygeneruje podmnožinu možností, ktoré sa pridajú do množiny zámerov. Ak je v množine zámerov atomická formula, tak ju agent vykoná. Ďalej agent dostane nové vnemy, odstráni z množín prianí a zámerov už dosiahnuté a splnené priania a zámery. Taktiež odstráni všetky nesplniteľné priania a nedosiahnuteľné zámery, a potom sa cyklus opakuje.

2.2.3 Agentspeak(L)

Agentspeak(L) je agentne orientovaný jazyk založený na BDI logike a BDI modelu rozhodovania, a je jedným z prvých pokusov o realizáciu BDI agenta.

Agentspeak(L), podľa jeho autorov [9], pozostáva najmä z predikátov v tvare $b(t_1, \dots, t_n)$, kde ak b je predikátový symbol a t_1, \dots, t_n sú termy, tak $b(t_1, \dots, t_n)$ alebo $b(\mathbf{t})$ je atomická predstava. Ďalej, ak $b(\mathbf{t})$ je predstava, tak $!b(\mathbf{t})$ a $?b(\mathbf{t})$ značí cieľ. Nad cieľmi sa dá ešte definovať spúšťacia udalosť, ktorá je v tvaroch $+b(\mathbf{t})$, $-b(\mathbf{t})$, $+!b(\mathbf{t})$, $-!b(\mathbf{t})$, $+?b(\mathbf{t})$ a $-?b(\mathbf{t})$.

Ak máme a ako akčný symbol a t_1, \dots, t_n sú termy, tak potom $a(t_1, \dots, t_n)$ alebo $a(\mathbf{t})$ značí akciu. Ak agent má nejaký cieľ a vie robiť akcie, tak by si mal dokázať vyrobiť plán, ktorý ho dovedie ku splneniu jeho zámerov. Takýto plán v jazyku *Agentspeak(L)* má tvar:

$$e : b_1 \wedge b_2 \wedge \dots \wedge b_n \leftarrow h_1; h_2; \dots; h_m$$

Kde e značí spúšťaciu udalosť, b_1, \dots, b_n sú predstavy, taktiež nazývané kontext a h_1, \dots, h_m sú ciele a akcie.

Po týchto definíciách môžeme už definovať agenta, ktorý je definovaný ako n -tica:

$$Ag = (E, P, B, I, A, S_e, S_O, S_I)$$

Kde E je množina udalostí, P je množina plánov, B je množina predstáv, I je množina zámerov, A je množina akcií, S_e je funkcia výberu udalostí z množiny E , S_O je funkcia výberu aplikovateľného plánu a S_I je funkcia výberu zámeru z množiny I .

Plán $e : b_1 \wedge b_2 \wedge \dots \wedge b_n \leftarrow h_1; h_2; \dots; h_m$ je aplikovateľný vzhľadom na udalosť ϵ práve vtedy, ak existuje relevantný unifikátor σ pre e a ϵ a existuje substitúcia θ taká, že

$$\forall (b_1 \wedge \dots \wedge b_n) \sigma \theta$$

je logický dôsledok z množiny B . Kompozícia $\sigma \theta$ sa nazýva aplikovateľný unifikátor.

Jason

*Jason*¹ je jazyk založený na jazyku *Agentspeak* a zároveň interpretačný nástroj jazyka *Agentspeak*. Syntax a sémantika jazyka je rovnaká s jazykom *Agentspeak*. Interpret samotný je napísaný v jazyku Java a bol vyvinutý pánmi Bordini a Hübner [2].

¹<http://jason.sourceforge.net/wp/>

Zaujímavá časť jazyku a interpreta je najmä interpretačný cyklus, ktorý sa skladá z desiatich krokov:

1. **Vnímanie prostredia** - Agent dostáva vnemy z prostredia naprogramovaného v Jave.
2. **Aktualizovanie predstáv** - Agent po obdržaní vnemov aktualizuje svoju databázu predstáv. Pre agenta sú najdôležitejšie zmeny predstáv, lebo zmeny sú spúšťacími udalosťami akcií.
3. **Obdržanie správ od iných agentov** - Správy od iných agentov sú ďalším užitočným zdrojom informácií pre agentov.
4. **Výber sociálne vhodných správ** - Predtým, ako sú správy spracované, musia byť vyfiltrované správy, ktoré by agent nemal prijať. Je to najmä na odstránenie komunikácie od agentov, ktorý nesmú s daným agentom komunikovať.
5. **Výber udalosti** - Agenti fungujú tak, že v každom cykle spracúvajú jednu udalosť, preto sa v tomto bode zvolí udalosť, ktorá sa v danom cykle spracuje.
6. **Získanie všetkých relevantných plánov** - Ak už má agent vybratú udalosť, ktorú ide spracovávať, získa si všetky plány, v ktorých sa dá spúšťacia udalosť unifikovať s vybratou udalosťou.
7. **Získavanie aplikovateľných plánov** - Keď už agent má všetky relevantné plány, musí zistiť, ktoré z tých plánov sú aj aplikovateľné, čiže existuje substitúcia θ , pri ktorej je splnený kontext plánu tak, ako to je popísané v podkapitole 2.2.3.
8. **Zvolenie jedného aplikovateľného plánu** - Keď už má agent množinu aplikovateľných plánov, musí si z nich vybrať jeden, ktorý sa bude snažiť vykonať. Zvolený plán sa stane agentovým zámerom a bude pridaný do množiny agentových zámerov.
9. **Zvolenie zámeru na vykonanie** - Ako je možné čakať, agent nemá iba jeden zámer, ale má ich celú množinu a v jednom kroku môže vykonať iba jeden krok z jedného zámeru. Preto agent musí vybrať, z ktorého zámeru formulu vykoná.
10. **Vykonanie kroku zámeru** - Záverečná fáza interpretačného cyklu agenta, v ktorej agent vykoná krok zámeru, a tým pôsobí na prostredie.

Ako je možné vidieť z interpretačného cyklu, tak agent v každom cykle získava vnemy, dokáže spracovať jednu udalosť z prostredia a vykonať jeden krok zámeru. Pre ukončenie interpretačného cyklu je ale vhodné ešte odstrániť dokončené zámery z množiny zámerov. Taktiež ak sa plán nepodarí vykonať, tak je odstránený z množiny zámerov.

Kapitola 3

Bojové taktiky a manévry

Už v dobe prvých lietadiel a súbojov medzi nimi sa zistilo, že náhodné manévrovanie nie je veľmi optimálne a neposkytuje množstvo pozícií, z ktorých sa dá strieľať. Preto sa mnoho letcov a stratégov zaoberalo vzdušnými súbojmi a vymysleli rôzne manévry a taktiky, ako sa rýchlo dostať do výhodnejšej bojovej pozície a poraziť oponenta. Ako zdroj väčšiny informácií som použil manuál, pre tréning letcov americkej armády [5].

Hlavným komponentom výhodnejšej pozície je energia. Vo fyzike poznáme dva druhy energie, a to kinetická a potenciálna. Tieto energie sú dôležité aj pri leteckých súbojoch, kde kinetická energia má formu rýchlosti a potenciálna energia má formu výšky. Správna správa energie je pri leteckých súbojoch nesmierne dôležitá, pretože práve vďaka energii je lietadlo schopné vykonávať manévry. Jednotlivé zložky energie sa medzi sebou dajú prevádzať práve vykonávaním manévrov, ale je potrebné si ich udržiavať v rozumných hraniciach, pretože ak lietadlo neletí dostatočnou rýchlosťou, môže stratiť vztlak a stať sa neovládateľným.

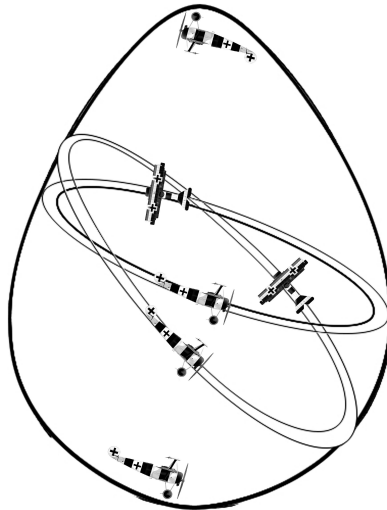
Prevod energií nastáva manévrovaním lietadla po vertikálnej osi zeme. Pri manévrovaní by človek očakával, že pri rovnakom natočení riadiacej páky bude lietadlo letieť rovnako, alebo pri držaní páky lietadlo letí do kruhu. To však pri vertikálnom manévrovaní neplatí, pretože na lietadlo pôsobí gravitácia, ktorá vychýľuje dráhu letu. Z tohto dôvodu dráha lietadla pri konštantnom natočení nie je kruh, ale vajce. Táto trajektória sa nazýva taktické vajce a je možné ju vidieť na obrázku 3.1. Počas leteckých súbojov sa lietadlá snažia udržať rovnakú energiu, alebo jej čo najviac získať, ale v určitých momentoch musia trochu energie obetovať. Tieto momenty sú, ak sa snažia dostať do streleckej pozície, alebo zabrániť nepriateľovi, aby sa dostal do streleckej pozície; ak sa snažia získať manévrovací priestor, alebo ubrať nepriateľovi manévrovací priestor.

3.1 Základné pojmy a geometrie

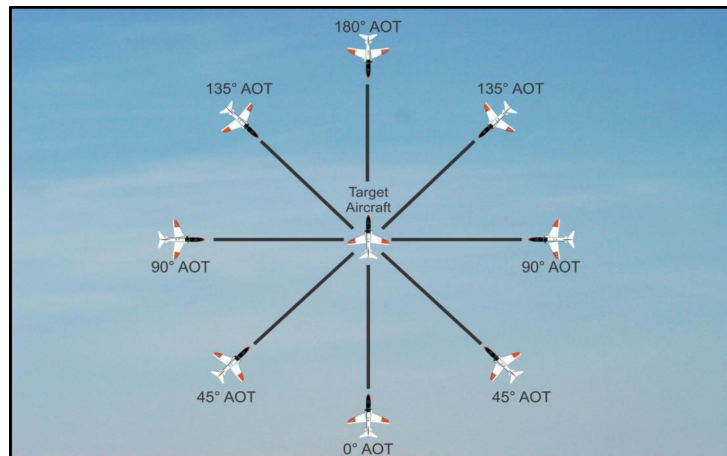
Aby sme boli schopný rozumieť terminológií leteckých manévrov a pochopiť, ako prebiehajú potrebujeme najprv poznať terminológiu.

Prvý zo základných pojmov je *dosah* alebo *dostrel* (range). Dosah udáva lineárnu vzdialenosť medzi dvoma lietadlami. Udáva taktiež rozsah vzdialenosti, v ktorom je možné použiť zbraň, ale určuje aj množstvo manévrovacieho priestoru v porovnaní s nepriateľom.

Ďalší dôležitý pojem je *uhol od chvosta* (Angle Off the Tail (AOT)), ktorý udáva relatívny uhol medzi chvostom brániaceho sa lietadla a utočnickovým lietadlom. Uhol môže byť v rozmedzí od 0° na chvost obrancu, do 180° pred obrancom. AOT je nezávislý na strane



Obr. 3.1: Pôsobenie gravitácie na vertikálne manévrovanie lietadla [5]



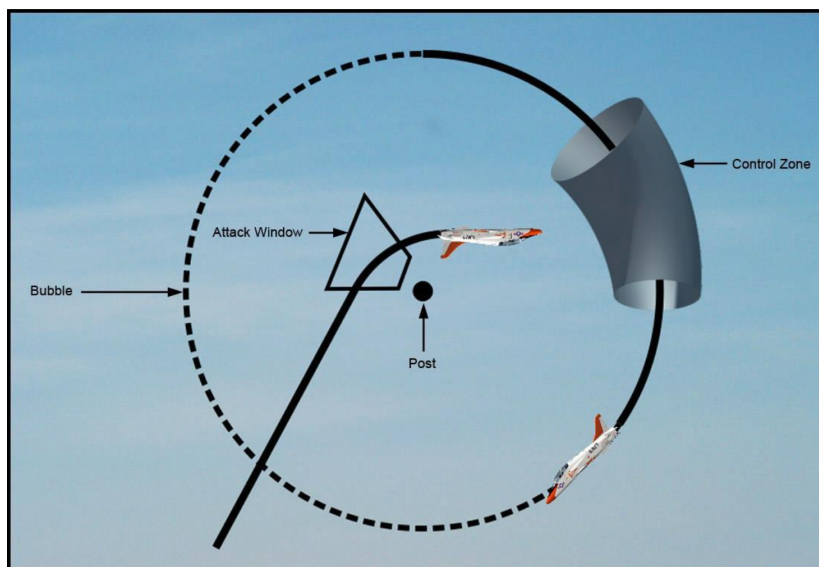
Obr. 3.2: Znázornenie uhlu od chvosta [5]

a nepotrebuje jej špecifikáciu. Väčšinou značí útočnú výhodu lietadla. Znázornenie AOT je možné vidieť na obrázku 3.2.

Rýchlosť približovania je ďalší dôležitý pojem pri leteckých súbojoch. Je to v podstate rozdiel rýchlostí medzi jednotlivými lietadlami. Spoločne s dosahom a AOT tvoria tri základné parametre (RAC) pre popis pozície voči súperovi pri leteckom súboji.

Nesmierne dôležitý je aj pojem *polomer otáčania* alebo *otáčkový kruh* (turning circle). Je to v podstate trajektória, ktorú lietadlo opíše pri otáčke pri danom množstve energie. Na polomere otáčania sú najdôležitejšie jeho tri komponenty, a to *bublina*, *kontrolná zóna* a *útočné okno*. Ich znázornenie je možné vidieť na obrázku 3.3.

Bublina je podobne ako otáčkový kruh trajektória, ktorú by lietadlo opisalo pri otáčaní, ale pri maximálnom výkone lietadla. Čiže ak lietadlo letí s maximálnym výkonom, tak bublina aj otáčkový kruh sú to isté. Pri maximálnom výkone je polomer otáčania lietadla najmenší a rýchlosť otáčania najvyššia. Bublina je veľmi dôležitá pri leteckých súbojoch, pretože ak sa útočník nachádza v obrancovej bubline, tak obranca nedokáže nijakým manévrom ubrať útočníkovi manévrovací priestor. Naopak, ak je útočník mimo bubliny, obranca



Obr. 3.3: Znáznornenie polomeru otáčania a jeho komponent [5]

môže znižovať uhol od chvosta (AOT), a tak dostať oponenta do neutrálnej pozície, čiže na 180° AOT.

Kontrolná zóna je kužeľová výseč myslene umiestnená asi 600 metrov, až 1 kilometer za lietadlom a je asi 10 stupňov široká. Ak sa útočník dostane do kontrolnej zóny lietadla a má pod kontrolou dosah, AOT a rýchlosť približovania, tak obranca nemá žiadnu šancu na odstránenie pozíčnej výhody útočníka a môže už iba čakať, kedy zaútočí. Útočník sa vždy snaží dostať do kontrolnej zóny a obranca sa snaží v tom útočníkovi zabrániť.

Útočné okno je pozícia, v ktorej ak útočník vykoná správny manéver, tak sa dostane do obrancovej kontrolnej zóny so správnym dosahom, AOT a správnou rýchlosťou približovania.

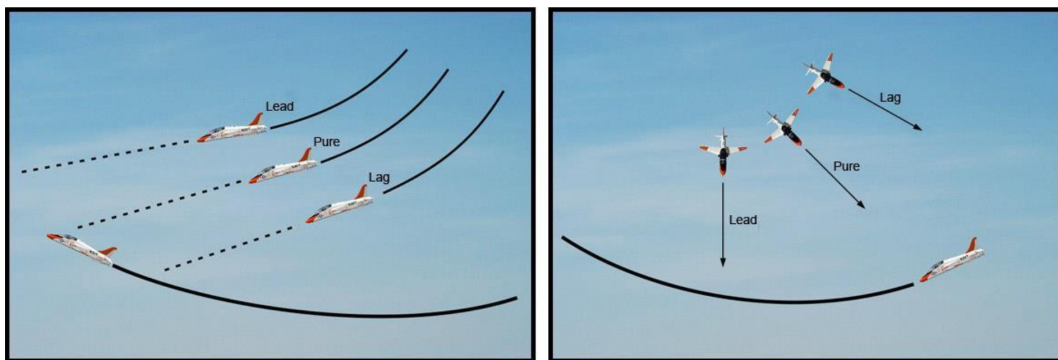
Lietadlá vždy letia v nejakej rovine a pri leteckom súboji je dôležité poznať, či sú dve lietadlá v rovnakej rovine, alebo nie. V jednej letovej rovine sú, ak ich letové roviny zvierajú uhol najviac 45°

Základom každého taktického manévru sú *stíhacie krivky*. Správne využívanie stíhacích kriviek je hlavný spôsob riešenia problémov s RAC parametrami (dosah, AOT, rýchlosť približovania). Existujú tri druhy stíhacích kriviek, a to *vedúca krivka* (lead), *rýdza krivka* (pure) a *zaostávajúca krivka* (lag). Stíhacie krivky sa ešte mierne líšia podľa toho, či sú lietadlá v rovine alebo nie. Ukážku stíhacích kriviek v rovine aj mimo roviny je možné vidieť na obrázku 3.4. Každá z nich sa používa na inú úpravu RAC parametrov.

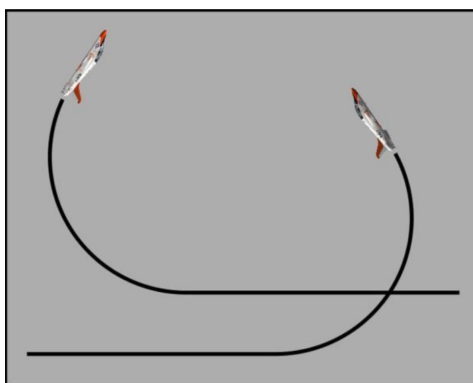
Lietadlo stíha oponenta vedúcou krivkou, ak je nasmerované mierne pred oponenta. Vďaka vedúcej stíhacej krivke lietadlo zníži svoj dosah, zvýši AOT a zvýši rýchlosť približovania. Používa sa najmä na vstup do oponentovej bubliny a na prípravu zbraní pred útokom.

Rýdza stíhacia krivka je podobná ako vedúca, ale miernejšia. Lietadlo je pri nej nasmerované priamo na oponentovo lietadlo. Taktiež ako vedúca krivka znižuje dosah, zvyšuje AOT a rýchlosť približovania. Používa sa taktiež na zameriavanie zbraní, a to najmä tepelne navádzaných v momentoch, že už sa nachádzame v oponentovej bubline.

Zaostávajúca krivka je presný opak vedúcej krivky, čiže lietadlo je pri nej nasmerované za oponentovo lietadlo. Pri použití zaostávajúcej krivky zvyšujeme alebo udržiavame dosah



Obr. 3.4: Zobrazenie stíhacích kriviek v rovine (vľavo) a mimo roviny (vpravo) [5]



Obr. 3.5: Znázornenie jedno-kruhovej otočky [5]

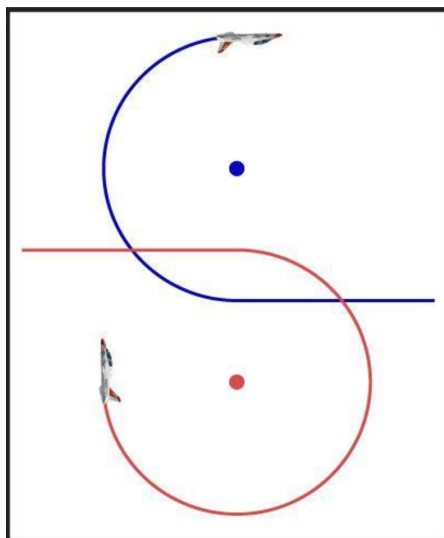
a znižujeme, alebo udržiavame AOT a rýchlosť približovania. Zaostávajúca krivka sa používa na udržiavanie parametrov, ale aj na zníženie príliš veľkej rýchlosti približovania, ktorá môže vzniknúť pri chybe v manévrovaní.

Ďalším dôležitým aspektom vzdušného súboja je otáčanie, a to najmä ak lietadlá letia proti sebe. V momente stretnutia môžu nastať dva druhy otáčania, *jedno-kruhové* otáčanie a *dvoj-kruhové* otáčanie. Pri otáčaní je nesmierne dôležité odhadnúť správny moment začiatku otočky a jej smer, pretože tieto otočky sa používajú pri začiatku súboja a ich výsledok rozhoduje, ktoré lietadlo sa dostane do lepšej pozície a bude útočiacim.

Jedno-kruhové otáčanie nastáva, ak v momente stretu lietadiel začnú obe lietadlá točiť do tej istej strany, okolo toho istého stredového bodu. Jedno-kruhovú otočku je možné vidieť na obrázku 3.5. Pri tejto otočke letia lietadlá znovu proti sebe (nose-to-nose). Pri tejto otočke záleží na polomere otáčania, a preto lietadlo, ktoré má pri otočke menší polomer otáčania sa na konci dostane do pozičnej výhody, pritom nezáleží na rýchlosti otáčania.

Dvoj-kruhová otočka nastáva, ak lietadlá pri strete začnú točiť do opačných smerov, pričom vo vzduchu tvoria akoby dve kružnice. Túto otočku je možné vidieť na obrázku 3.6. Pri dvoj-kruhovej otočke sa do výhody dostane to lietadlo, ktoré stihne svoju otočku dokončiť skôr, a tým sa dostane za druhé lietadlo. Na to, aby lietadlo dokončilo svoju otočku skôr, potrebuje mať väčšiu rýchlosť otáčania ako protivník.

Posledný nemenej dôležitý pojem je *prebehnutie* (overshoot). Prebehnutie nastáva najmä v dôsledku zlého spravovania RAC parametrov, napríklad pri prílišnom približovaní alebo zvyšovaní AOT. Pri prebehnutí vždy dôjde ku určitej strate pozičnej výhody, dokonca pri niektorých druhoch prebehnutia sa môžu aj obrátiť role lietadiel a útočiacie lietadlo sa bude



Obr. 3.6: Znáozornenie dvoj-kruhovej otočky [5]

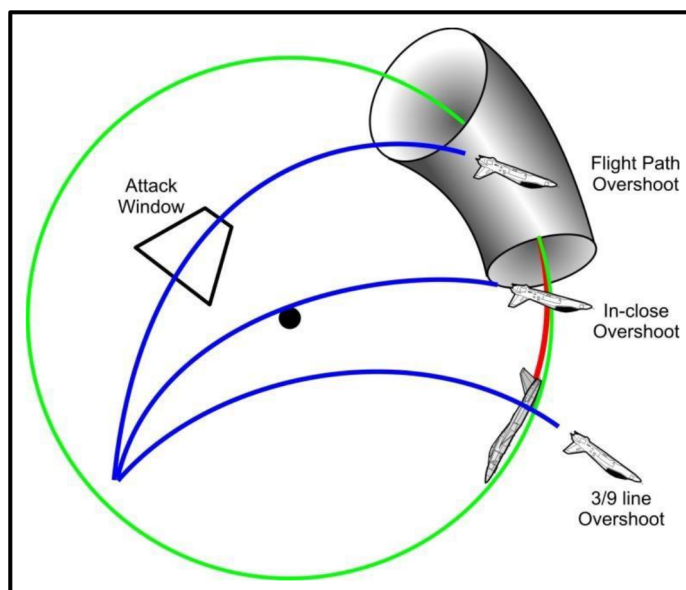
musieť brániť. Poznáme tri druhy prebehnutia: *3/9 prebehnutie* (3/9-line overshoot), *blízke prebehnutie* (In-Close overshoot) a *trajektóriové prebehnutie* (Flight path overshoot). Všetky tri typy prebehnutia sú zobrazené na obrázku 3.7.

Prvým a zároveň najhorším typom prebehnutia je *3/9 prebehnutie*. 3/9 sa volá podľa čiary, ktorú opisujú krídla lietadla pri popise pozície ciferníkom hodín. Toto prebehnutie nastáva, ak útočiace lietadlo prekročí pomyselnú 3/9 čiaru a dostane sa pred druhé lietadlo. Po tomto prebehnutí nastáva výmena úloh a útočiace lietadlo sa musí brániť. Takúto situáciu je možné vidieť na obrázku 3.8.

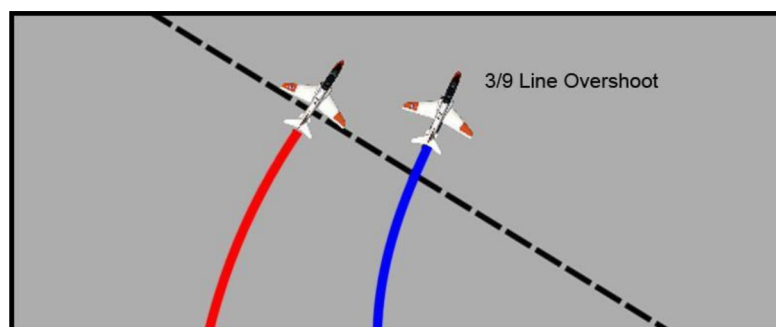
Trajektóriové prebehnutie nastáva, ak útočník pri otáčaní pretne trajektóriu obrancu. Pri tomto prebehnutí nie je garantovaná výmena rolí. Ak toto prebehnutie prebehne v oblasti kontrolnej zóny obrancu alebo až za ňou, tak si útočník stále udrží útočnú pozíciu, ale stratí dosah a AOT. Ak by sa obranca pri tomto prebehnutí rozhodol narovnať svoju otáčku alebo dokonca začať točiť na druhú stranu, tak tým iba pomôže útočníkovi a zlepši mu uhol od chvosta, preto najlepšou stratégiou je pokračovať v otáčke. Tento druh prebehnutia je možné vidieť na obrázku 3.9.

Blízke prebehnutie je ďalšie nebezpečné prebehnutie, v ktorom môže dôjsť k výmene rolí. Blízke prebehnutie nastáva, ak útočiace lietadlo pretne trajektóriu obrancu vo vzdialenosti menšej ako je kontrolná zóna. Ak pri tomto prebehnutí obranca zmení smer otáčky, tak môže dosiahnuť až 3/9 prebehnutie, a tým si s útočníkom zameniť role. Dôležité je ale načasovanie zmeny smeru, pretože ak obranca začne meniť smer ešte pred tým, ako dôjde ku prebehnutiu, tak sa vystaví na dostrel útočníka. Obranca by mal točiť do opačnej strany až po prebehnutí a aj to jedine v prípade, že spĺňa všetky z nasledujúcich troch podmienok:

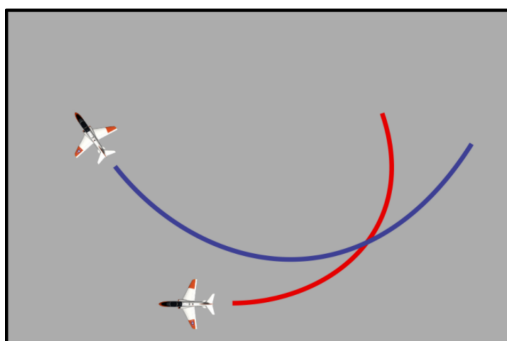
1. Útočník je bližšie ako kontrolná zóna lietadla.
2. Uhol smerovaní lietadiel je väčší ako 60°
3. Obranca má útočník priamo na dohľad



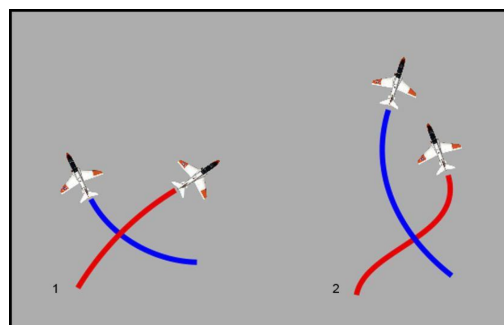
Obr. 3.7: Znázornenie troch druhov prebehnutia [5]



Obr. 3.8: Znázornenie 3/9 prebehnutia pri pohľade zhora [5]



Obr. 3.9: Trajektóriové prebehnutie [5]



Obr. 3.10: Blízke prebehnutie [5]

3.2 Zbraňové systémy

Dôležitou súčasťou leteckých súbojov sú aj zbrane, pretože lietadlo bez zbraní v súboji nič nespraví. Jednou z prvých zbraní používaných v leteckých súbojoch sú guľomety. Guľomety v lietadlách boli buď pevne pripevnené alebo pohyblivé. Pohyblivé guľomety sú tiež pripevnené k lietadlu, avšak majú schopnosť mierneho pohybu do strán. Často si práve tieto druhý zbraň vyžadovali operátora v lietadle a preto lietadlá s pohyblivými guľometmi mali dvojčlenné posádky.

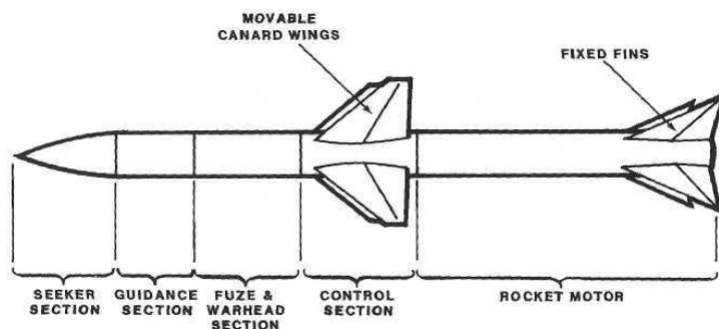
Možno sa zdá, že pevne pripevnený guľomet je pre letecký súboj horší, pretože pre správne mierenie je nutné otočiť celé lietadlo, avšak opak je pravdou. Pevne pripevnené guľomety sú zvyčajne ľahšie a menšie, čím znižujú odporovú silu vetra a tým pádom lietadlá s pevne pripevnenými guľometmi majú lepší výkon. Čo sa týka manévrovania, tak to je tiež ľahšie pre pilota, pretože si nepriateľa musí držať vždy iba v prednej časti lietadla. Z týchto faktov vyplýva, že pevne pripevnené guľomety sú výhodnejšie pre použitie v menších lietadlách, pri ktorých sa kladie dôraz na manévrovateľnosť, kým pohyblivé guľomety sú vhodnejšie pre veľké lietadlá.

Ďalšie dôležité parametre pri guľometoch sú veľkosť projektilu a rýchlosť strelby. Možno sa to nezdá, ale tieto dva parametre si vzájomne odporujú, a to čím je projektil zbrane väčší, tým pomalšie dokáže guľomet strieľať. k tomuto faktoru dochádza najmä preto, že väčšia nábojnica je často ťažšia a z dôsledku zotrvačnosti sa pomalšie pohybuje do hlavne zbrane. Čiže zvolené zbrane pri lietadlách taktiež hrali rolu a väčšinou sa preto lietadlá rozdeľovali do dvoch skupín podľa zamerania. Lietadlá, ktoré boli určené na ničenie bombardérov a ťažko obrnených lietadiel používali guľomety s veľkými projektilmi, pretože takéto pár dobre mierených striel tohto typu dokázalo prebiť brnenie a poškodiť nepriateľa. Na druhej strane malé stíhače, ktorých cieľom bolo ničť rýchlo pohybujúce sa stíhače potrebovali väčšiu rýchlosť strelby, pretože ich nepriatelia nemali toľko pancierovania v lietadle.

V priebehu času sa trend začal posúvať k ničivejším zbraňam a to kanónom, ktoré dokázali zničiť lietadlo jednou strelou, avšak tieto kanóny sú ťažšie a dlho sa prebívajú, preto opäť dávali zmysel iba pri väčších lietadlách. Na konci druhej Svetovej vojny na scénu prišli rotačné guľomety, ktoré dokázali výrazne zrýchliť rýchlosť strelby obmedzením prehrievania hlavne, pretože rotačný guľomet mal týchto hlavných viac.

S nástupom stíhačiek sa však guľomety presunuli do úzadia najmä preto, lebo ich bočné umiestnenie spôsobovalo nerovnomerné turbulencie pri krídlach a vylučovanie plynov zbrane muselo byť taktiež prispôbené tak, aby plyny nevnikli do tryskového motora stíhačky. Vysoké rýchlosti letu hrali tiež znižovali efektivitu guľometov. Preto sa už počas druhej Svetovej vojny začali objavovať prvé rakety a v povojnovom období na scénu prišli už aj navádzané strely. Typický tvar takejto strely je možné vidieť na obrázku 3.11 a takéto strely sa skladali z navádzacej časti, pohonnej časti a neodmysliteľnou časťou je aj výbušná hlavica.

Pohonnú časť rakety môže tvoriť hocijaký motor, ale najpoužívanejšie sú tryskové motory, pretože stíhačky dosahujú vysokých rýchlostí a rakety potrebujú tieto rýchlosti dokonca až prekonať. Existujú však dva typy tryskových motorov, a to motory na pevné palivo, ktoré sú väčšinou ľahšie, menšie a lacnejšie, preto sa v leteckých súbojoch používajú ako zbrane krátkého až stredného doletu. Rakety na pevné palivo majú však nevýhodu v tom, že po ich odpálení sa motor už nedá ovládať a letí až kým mu nedôjde palivo. Druhým typom motora na pohon rakiet je motor na plyné palivo. Pri týchto typoch motorov sa dá sila motora kontrolovať a v prípade potreby dokonca až zastaviť. Rakety s motorom na plyné palivo sa používajú iba ako rakety na dlhé vzdialenosti, a to najmä kvôli ich cene.



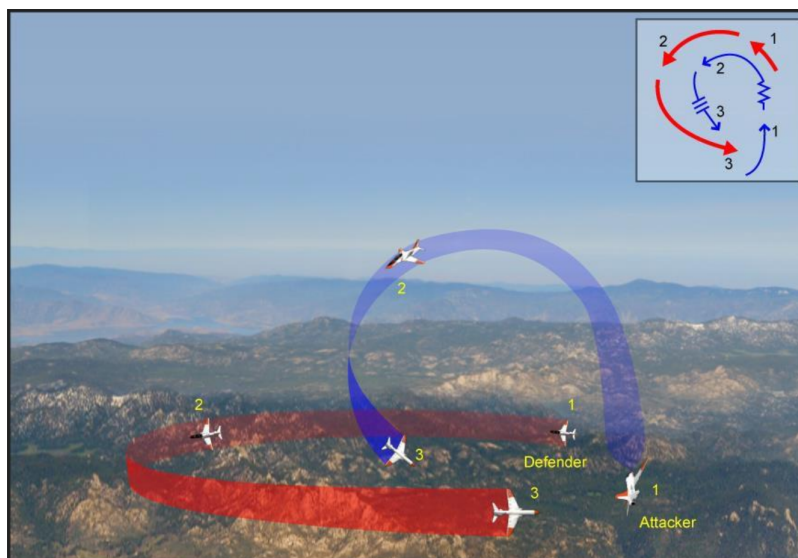
Obr. 3.11: Znáozornenie častí navádzanej strely [12]

Navádzacia časť rakety má za účel smerovať raketu a ovládať jej letové vlastnosti tak, aby sa dostala k cieľu. Pri vývoji rakiet sa vymyslelo viacero možností navádzania rakety. Najjednoduchšia možnosť navádzania je pomocou predštartového nastavenia, kde sa cieľ rakety nastaví ešte pred vystrelením. Po vystrelení sa však už tento cieľ nedá zmeniť, preto sa tento systém zväčša kombinuje ešte s inými navádzacími systémami. Ďalším typom sú rakety, ktoré sa vo vzduchu dajú ovládať príkazmi. Tento typ rakety musí mať svoj radarový systém, ktorý dokáže príkazy prijímať. Avšak tieto rakety sú náchylné na rušenie signálu. Mierne odolnejšie navádzanie rakety na rušenie je navádzanie lúčom. Lúčom navádzané rakety smerujú vždy k lúču svetla, alebo radarového žiarenia. Toto žiarenie môže byť vychádzať z lietadlá, ktoré raketu vystrelilo, alebo sa táto raketa môže smerovať k radarovému žiareniu vychádzajúceho z nepriateľského lietadla. v poslednom rade sa rakety dajú navádzať infra-červeným žiarením. Tieto rakety sa zamerajú na tepelnú stopu lietadla a smerujú vždy k nej. Výhodou rakiet navádzaných infra-červeným žiarením je, že sa môžu vystreliť z každého aspektu, čiže útočiacie lietadlo už nemusí byť vždy za nepriateľom, avšak raketa vypustená na zadnú hemisféru má väčšiu šancu na úspešný zásah.

Výbušná hlavica je posledná časť rakety a práve táto časť pôsobí škodu na lietadlách. Táto časť v sebe obsahuje aj rozbušku a práve tá je kľúčová pre správne odpálenie nálože. Pri nesprávnom načasovaní výbuchu môže raketa stratiť efektivitu a dokonca sa stať aj úplne neškodnou. Dôležité je aby raketa nevybuchla ešte pred vystrelením, preto sa rozbušky aktivujú až po vystrelení a to buď elektronicky alebo zotrvačnosťou. Po aktivácii je schopná rozbuška iniciovať výbuch. Táto iniciácia môže nastať v dôsledku kontaktu, blízkosti k zdroju tepla alebo hluku, alebo po uplynutí určitého času. Pri iniciácii výbuchu rozbuškou je nutné rátať aj so zdržaním a preto by rozbuška mala iniciovať výbuch malú chvíľku pred tým, ako v skutočnosti má nastať.

3.3 Bojové taktiky pri súboji jeden na jedného

Poznať jednotlivé bojové prvky je v podstate nevyhnutelné pre vzdušné súboje, avšak samotné prvky nestačia. Skutočné majstrovstvo vzdušných súbojov je dokázať tieto prvky použiť v správnom čase a v správnom poradí, čiže používať vhodné manévry a taktiky. Použitie správnej taktiky zaručuje získanie pozíçnej výhody nad súperom a v konečnom dôsledku aj porazenie súpera.



Obr. 3.12: Znázornenie manévru vysoké jojo [5]

3.3.1 Vysoké Jojo

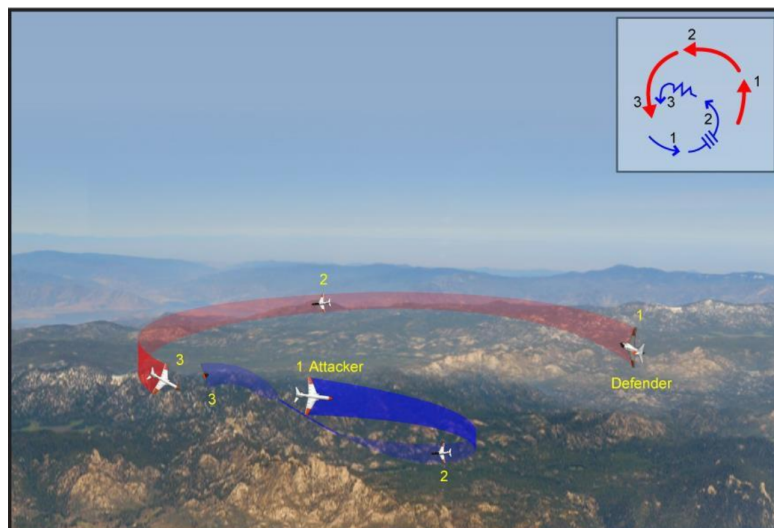
Vysoké jojo je útočný manéver, ktorý využíva zaostávajúcu stíhaciu krivku. Používa sa najmä na spomalenie približovania, a tým pádom na zabránenie prebehnutiu. Vysoké jojo pozostáva zo štvrt-otočky so zdvihnutým predkom lietadla, čím sa lietadlo spomalí a vymení časť rýchlosti za výšku, ako je možné vidieť na obrázku 3.12. Touto výmenou sa útočník dostane nad obrancu, a pretože má nižšiu rýchlosť, bude mať aj menší polomer otáčania, a tým pádom je schopný znížiť alebo zachovať dosah podľa potreby.

Vysoké jojo je nebezpečný manéver, ktorý sa používa ako posledná záchrana pred prebehnutím. Avšak nie pri trajektóriovom prebehnutí, ktoré je často prijateľnejšou voľbou, pretože sa z neho dá skôr dostať do útočnej pozície. Ak obranca zaregistruje, že útočník robí vysoké jojo, tak sa mierne uvoľnil spod tlaku útočníka a môže tento čas využiť na opätovné získanie energie.

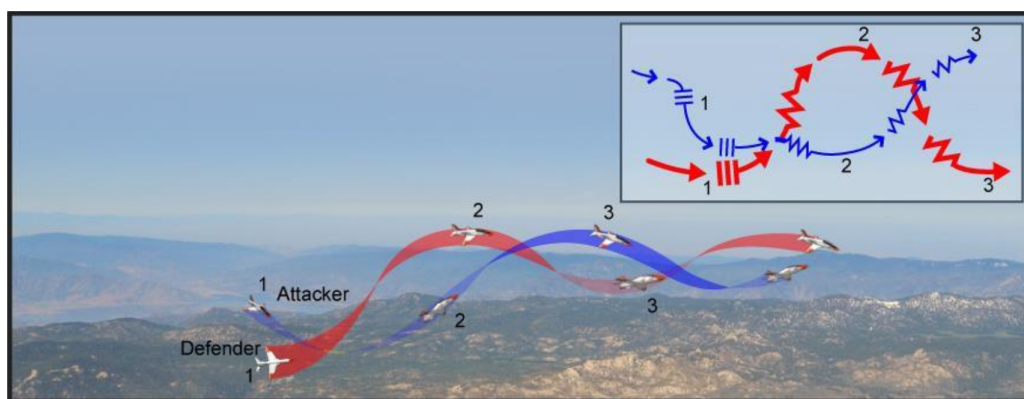
3.3.2 Nízke Jojo

Nízke jojo je podobne ako vysoké jojo útočný manéver, ktorý ale používa vedúcu krivku. Používa sa na priblíženie k súperovi alebo zlepšenie útočného uhla AOT, a to najmä po manévroch, ktoré používajú zaostávajúcu krivku ako je napríklad vysoké jojo. Na využitie nízkeho joja je nutné, aby obranca menil smer. Ak obranca mení smer, tak vykonáme nízke jojo tým, že zatočíme do obrancovho smeru otáčania so skloneným predkom lietadla, čím klesneme pod obrancu, a potom následným naberaním výšky naspäť na pôvodnú výškovú hladinu. Tento manéver je možné vidieť na obrázku 3.13.

Pri nesprávnom použití nízkeho joja môže útočník až príliš znížiť dosah alebo príliš zvýšiť rýchlosť približovania, a tým môže dôjsť k prebehnutiu. Pri bránení sa proti nízkemu joju je najlepšie čo najrýchlejšie klesnúť tiež na útočnickovu hladinu letu a čo najviac priťahnúť polomer otáčania, čím protivníkovi znemožníme získanie lepšieho dosahu a AOT. Týmto obranným manévrom síce stratíme výšku, ale predĺžime súboj.



Obr. 3.13: Znázornenie manévru nízke jojo [5]



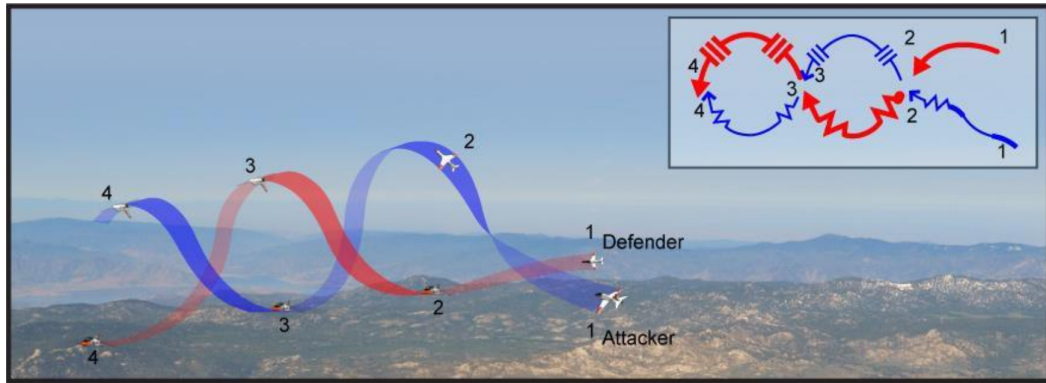
Obr. 3.14: Znázornenie plochých nožníc v súboji [5]

3.3.3 Ploché nožnice

Ak v leteckom súboji nastane prebehnutie, tak sa ho súper vždy snaží využiť vo svoj prospech. Jedným z manévrov, ktoré dokážu potrestať prebehnutie v horizontálnom smere sú ploché nožnice. Pri tomto manévri sa obe lietadlá snažia dostať za to druhé v sérii jedno-kruhových otočiek. Pozičnú výhodu získa lietadlo, ktoré dokáže znížiť svoju rýchlosť viac ako protivník alebo dokáže jednotlivými otočkami preletieť s menším polomerom otáčania. Pri otáčaní sa obe lietadlá snažia používať zaostávajúcu stíhaciu krivku. Tento manéver je možné vidieť na obrázku 3.14.

3.3.4 Vertikálne nožnice

Vertikálne nožnice sú taktiež manéver, ktorým sa dá využiť prebehnutie protivníka, ale vo vertikálnom smere. Podobne ako pri plochých nožniciach, vertikálne pozostávajú zo série jedno-kruhových otočiek, ale vo vertikálnom smere, pričom pohyb lietadiel pripomína rolovanie. Tento pohyb je možné vidieť na obrázku 3.15. Pozičná výhoda sa získava tiež podobne ako pri plochých nožniciach, čiže menšou rýchlosťou a menším polomerom otáča-



Obr. 3.15: Znáznornenie vertikálnych nožníc v súboji [5]

nia, ale keďže je tento pohyb vertikálny, otáčky nie sú kruhové, ale opisujú taktické vajce z obrázka 3.1. Ak chceme opisovať menší polomer otáčania, a tým vyhrať pozíčnú výhodu, musíme dokázať odhadnúť správny okamih začiatku stúpania/klesania. Ak sa nachádzame na spodku, pod súperom, tak výhodu dosiahneme tým, že začneme stúpať skôr ako súper začne klesať a ak sme na vrchu súboja, tak sa snažíme začať klesať skôr ako súper začne stúpať.

Čím dlhšie trvá tento manéver, tým viac obe lietadlá strácajú energiu a výšku, preto ak tento manéver trvá veľmi dlho, tak lietadlá nebudú mať dostatok energie na vystúpanie a manéver zdegeneruje na ploché nožnice. Lietadlo, ktoré ako prvé prejde do plochých nožníc do dostáva do nevýhody a stáva sa obrancom, práve pre to je dôležitá dobrá správa energie.

Kapitola 4

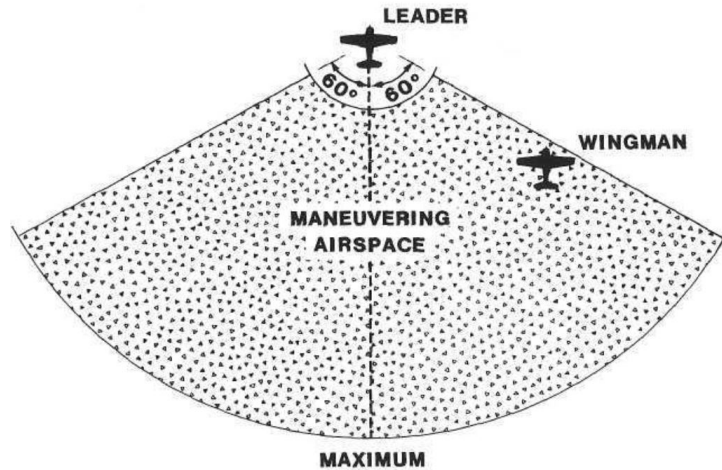
Súboje letiek

Bojové taktiky, spomínané v predchádzajúcej kapitole, sú hlavným stavebným prvkom každého leteckého súboja. Znalosť týchto taktík je postačujúca pri súbojoch jeden na jedného, ale už pri prvých vzdušných súbojoch sa zistilo, že osamotené lietadlo nie je veľmi efektívne. Táto neefektivita plynie z faktu, že pilot nemá z lietadla úplný rozhľad do všetkých smerov, napríklad ani s otočením hlavy nevidí za lietadlo a ani pod lietadlo. Z tohto dôvodu sa stáva osamotené lietadlo zraniteľné a často až príťažou. Kvôli tejto neefektivite sa začali do vzdušných súbojov zapájať letky s dvoma a viacerými lietadlami.

Pri súbojoch letiek sa taktiež používajú jednoduché bojové taktiky, ale sú ešte doplnené o zložitejšie manévry, v ktorých hrá každé lietadlo svoju rolu, a preto je dôležitá komunikácia medzi lietadlami. V období prvej svetovej vojny, keď lietadlá nemali ešte spoľahlivé komunikačné médiá, sa piloti dorozumievali prostredníctvom jednoduchých manévrov, nadmerného spaľovania paliva alebo dokonca svetlicami. Tieto metódy komunikácie neboli veľmi vhodné pre bojové účely, pretože piloti na seba museli vidieť. Ak stratili druhého pilota z očí, tak nedokázali medzi sebou komunikovať. V dnešnej dobe sú rádia spoľahlivé a k menej spoľahlivým metódam komunikácie sa piloti vracajú iba v prípade nutnosti, ak sa im poškodí rádio alebo ak sa nachádzajú v zóne so širokopásmovým rušením.

4.1 Letové formácie

Už v skorých fázach leteckých súbojov sa zistilo, že samostatné lietadlo nie je veľmi efektívne v súbojoch. Z tohto dôvodu začali lietadlá lietať v letkách po dvoch alebo viac lietadiel. Často aj keď letka pozostáva z viacerých lietadiel, tak sa počas vzdušného súboja rozdelí na viacero sekcií, kde v každej budú iba dve lietadlá. Toto sa deje preto, lebo každý pilot počas súboja musí manévrovať lietadlo, dávať pozor na súperov, ideálne iba jedného a zároveň musí vedieť o svojom parťákovi. Pri najmenšom možnom počte lietadiel musí každý pilot popri pilotovaní sledovať ešte dve lietadlá, to znamená, že musí robiť pri najmenšom tri veci zároveň. Priemerný človek dokáže v jeden čas robiť iba jednu vec, iba tréningom sa naučí vykonávať viac vecí zároveň. Preto sa nedoporučuje väčší počet lietadiel v sekciách alebo letkách. V letkách po dvoch lietadlách lietal lietadla v formáciách riadenými rôznymi doktrínami, medzi tri najvyužívanejšie patria: Bojové krídlo, Dvojité útok a "Loose deuce". Doktríny a taktiky z tejto kapitoly sú čerpané z knihy pána Shaw-a [12].



Obr. 4.1: Formácia lietadiel pri bojovom krídle [12]

4.1.1 Bojové krídlo

Doktrína nazývaná *Bojové krídlo* je jedna z najjednoduchších doktrín a používala sa najmä počas prvej svetovej vojny. Letka, ktorá sa riadila touto doktrínou pozostávala z vedúceho letky a jeho parťáka. Počas súboja bolo úlohou vedúceho pilota viesť súboj s protivníkom a úlohou jeho parťáka bolo dostať sa do vhodnej pozície, z ktorej mal dobrý výhľad na súboj, ale aj okolie tak, aby vedúceho pilota nič nezaskočilo. Parťák v tejto formácii nezasahoval do boja, iba ak to bolo úplne nevyhnutné alebo ho k tomu nevyzval jeho vedúci. Parťák tým pádom slúžil viac menej iba ako náhradný pár očí svojmu veliteľovi. Táto doktrína bola populárna najmä v časoch svetových vojen, keď bolo málo skúsených pilotov a neskúsení piloti boli zo začiatku užitoční pre skúsenejších pilotov aj bez množstva skúseností a zároveň dokázali splniť viac misií a nabráť skúsenosti, pretože sa nezapájali veľmi aktívne do súbojov.

Pri lete vo formácii je vedúci pilot vpredu a jeho parťák sa drží mierne za vedúcim pilotom, vzdialenosť závisí od výkonu lietadiel, ale mala by byť dostatočná, aby parťák stíhal reagovať na zmeny smeru letu vedúceho pilota. Parťák sa drží v uhle asi 60° spravidla po pravej strane vedúceho pilota. Táto formácia je zobrazená na obrázku 4.1. Pri takomto rozostavení má parťák dokonalý výhľad na svojho vedúceho pilota a taktiež na vedúceho zadnú hemisféru, čím znižuje pravdepodobnosť prepadnutia vedúceho pilota.

Bojové krídlo má dosť výhod, ale viac v ňom prevažujú nevýhody. Za prvé, tým, že parťák letí za vedúcim pilotom, nik nesleduje jeho zadnú hemisféru, a tým pádom nie je náročné to využiť na prekvapivý útok. Druhá nevýhoda je, že počas súboja si má parťák udržiavať vhodnú pozíciu, z ktorej má dohľad na súboj, ale aj okolie. Takéto udržiavanie pozície často vyžaduje vysokú mieru manévrovania, ktoré vyžaduje čas na úkor pozorovaniu okolia a informovania vedúceho pilota. Tretou veľkou nevýhodou je nedostatok ofenzívy, pretože aj v napriek tomu, že letka sa skladá z dvoch lietadiel, súboje sú vedené jeden na jedného. Druhé lietadlo nijako neznižuje dĺžku súboja a nie je nápomocné ani v prípadoch prepadnutia, pretože dva lietadla sa lepšie detekujú ako jedno.

4.1.2 Dvojitý útok

Keďže pri využívaní doktríny bojového krídla je využívaný vždy iba jeden letec, tak táto doktrína nijako neznižuje dobu boja oproti súbojom jeden na jedného. Z tohto dôvodu sa vymyslela a začala používať iná doktrína, nazývaná *Dvojitý útok*. Podobne ako pri bojovom krídle sa letka delí na vodcu a partáka a pri bežnom lete lietadlá letia v podobnej formácii. Na rozdiel od bojového krídla, pri dvojitom útoku v leteckej formácii môžu mať lietadlá od seba väčší rozstup, ktorý zlepšuje manévrovateľnosť jednotlivých lietadiel a znižuje šancu kolízie.

V horizontálnej rovine môžu byť lietadlá vedľa seba alebo diagonálne oddelené, najlepšie tak, aby si lietadlá navzájom kryli zadné hemisféry, ale to pri väčších rozstupoch nie je problém. Väčší problém je s vertikálnou rovinou, pretože je medzi jednotlivými rozstaveniami taktický rozdiel. Ak lietadlá letia v rovnakej letovej rovine, tak majú najlepší defenzívny rozhľad a výhľad na zadné hemisféry, ale horšiu manévrovateľnosť, čo v prípade útoku na nepriateľa znamená dlhší čas na prípravu pozície. Ak jedno lietadlo letí vo vyššej letovej rovine, ako druhé, tak získava väčší manévrovací priestor. Problém ale vzniká tým, že vrchné lietadlo nemá dostatočný výhľad na zadnú hemisféru spodného lietadla, pretože tento výhľad je blokovaný vlastným krídlom. Tento problém sa dá obmedziť tým, že vrchné lietadlo bude periodicky robiť vývrtky alebo sa bude vlniť, čo nezaručuje úplne krytie zadnej hemisféry a navyše zbytočné pohyby spôsobujú meniaci sa odraz svetla, ktorý môže prilákať nepriateľovu pozornosť. Ďalšia nevýhoda je, že v prípade prepadnutia musí spodné lietadlo nabráť výšku, čím stratí rýchlosť a dostáva sa do nevýhodnejšej pozície. Pri letoch sa avšak používa kombinácia oboch, a to menší rozstup v oblastiach s vysokým rizikom napadnutia a väčšie rozstupy naopak v bezpečnejších oblastiach.

Rozdiel medzi dvojitým útokom a bojovým krídlom je ale v samotných bojoch. Pri súbojoch sa už nerozdeľujú veľmi na vedúceho a partáka, ale na bojujúce a voľné lietadlo, pretože súboj začína vždy lietadlo, ktoré má lepšiu pozíciu na útok. Druhé lietadlo sa nemusí držať blízko bojujúceho lietadla a malo by si získať čo najlepšíu pozíciu, vystúpaním alebo získaním energie. Počas získavania lepšej pozície by však voľné lietadlo stále malo sledovať súboj a poskytovať vizuálne informácie pilotovi v bojujúcom lietadle. Bojujúce lietadlo sa sústreďuje na čo najrýchlejšie zneškodnenie nepriateľa. Bojujúcemu lietadlu sa nie vždy môže podariť zneškodniť nepriateľa a môže dokonca dôjsť k prestreleniu, čím sa stane obrancom. V takom prípade by mal upozorniť pilota voľného lietadla, ktorý v takom prípade zaútočí na nepriateľa a voľné a bojujúce lietadlo si vymenia role. Uvoľnené lietadlo sa tým dostane mimo tlaku nepriateľa a znova získava energiu. Rozdelenie na bojujúce a voľné lietadlo ale nemusí byť vždy úplne jednoznačné. Napríklad pri napadnutí nepriateľom sa lietadla najskôr rozdelia, a toto rozdelenie sa stane jasným až po rozhodnutí nepriateľa, na ktoré lietadlo začne útočiť.

Dvojitý útok prináša niekoľko výhod oproti bojovému krídlu. Prvá je, že je omnoho efektívnejší v ofenzíve, pretože za prvé súboj začína lietadlo, ktoré je v lepšej pozícii, a tým pádom by malo súboj vyhrať v kratšom čase. Za druhé sa voľné lietadlo nemusí manévrovať blízko svojho partáka, a tým pádom má viac možností získať energiu a bojovú výhodu. Tým, že sa lietadla môžu striedať, dokážu protivníka dostať až na dno energetických možností bez šance načerpať energiu naspäť, a tým pádom ho dostať do pozície, že sa už ďalej nebude môcť brániť. V defenzíve je dvojitý útok taktiež lepší ako bojové krídlo. Väčšie rozstupy medzi lietadlami umožňujú lepší výhľad lietadiel do zadnej hemisféry, dávajú viac priestoru na manévrovanie a zároveň znižujú pravdepodobnosť, že si nepriateľ všimne oba lietadlá naraz. Čo sa týka defenzívy pri súbojoch, je na tom dvojitý útok tiež lepšie, pretože ak

sa nepriateľ dostane do útočnej pozície pri jednom lietadle, je okamžite ohrozený druhým, a tým pádom má menší priestor na útok.

Dvojitý útok má aj nejaké nevýhody. Za prvé vyžaduje väčšie množstvo rozhodovania nad manévrami a omnoho viac komunikácie, ktorá je kľúčovým prvkom tejto doktríny. Rušenie komunikácie dokáže výrazne znížiť efektívnosť a koordináciu lietadiel. Ďalšia nevýhoda nastáva pri napadnutí voľného lietadla ďalším nepriateľom. V takom prípade voľné lietadlo nedokáže poskytnúť pomoc bojujúcemu lietadlu a súboj sa rozpadne na dva súboje jeden na jedného.

4.1.3 Loose deuce

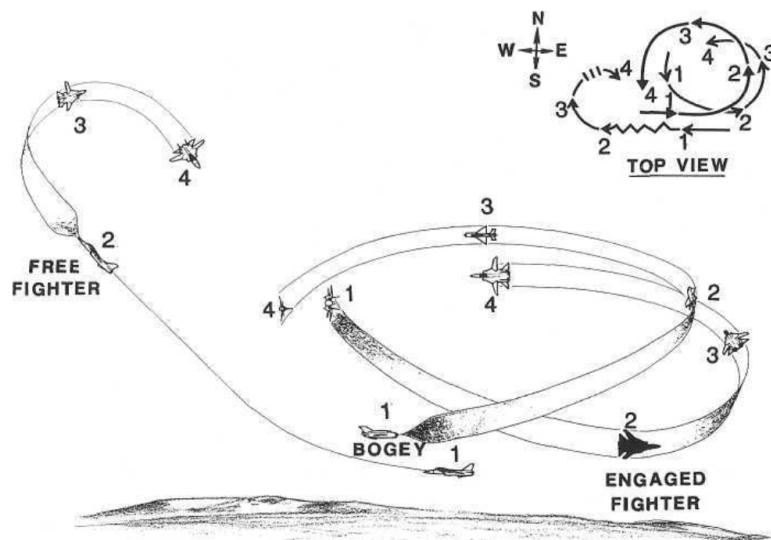
Doktrína nazývaná *Loose deuce* je veľmi podobná doktríne *Dvojitý útok*. Jednou z hlavných odlišností medzi nimi je ale správanie voľného lietadla. Pri využívaní doktríny *Loose deuce* sa voľné lietadlo snaží dostať do vhodnej útočnej pozície a zneškodniť nepriateľa. Pilot bojujúceho lietadla vyvíja útočný tlak na súper a snaží sa ho donútiť letieť v predvídateľnej trajektórii.

Pilot bojujúceho lietadla by mal pôsobiť dostatočný tlak na nepriateľa, aby mu znemožnil voľné manévrovanie, ale nemal by veľmi míňať svoju energiu. Ak by náhodou hrozilo, že bojujúci stratí útočnú prevahu alebo dokonca sa dostane do defenzívy, tak by to mal čo najskôr oznámiť svojmu partákovi a lietadlá by si mali vymeniť role bojujúceho a voľného lietadla. V prípade, že by bojujúce lietadlo stratilo viac energie a boj sa dostal čisto do obranných manévrov, tak je bojujúce lietadlo iba príťažou, pretože znemožňuje voľnému lietadlu útočiť, pre svoju blízkosť k nepriateľovi a možnosti zásahu oboch lietadiel. Naopak ak sa dostane do vhodnej pozície na výstrel, mal by strieľať na nepriateľa a nečakať na partáka.

Voľné lietadlo sa pri kontakte s nepriateľom snaží dostať do vhodnej útočnej pozície. Vo väčšine prípadov sa dá vhodná pozícia získať zmenou vertikálnej roviny lietadla a získaním energie. Vhodný spôsob získania útočnej pozície je klesnúť, a tým sa stratiť nepriateľovi, a potom naňho vystreliť odspodu. Tento prípad, ale s opačnou vertikálnou rovinou je možné vidieť na obrázku 4.2. Druhou úlohou voľného lietadla je podobne ako pri dvojitom útoku pozorovať okolie a defenzívne uhly seba aj svojho partáka.

Doktrína *Loose deuce* má oproti *Dvojitému útoku* značnú útočnú výhodu, pretože sa oba lietadlá snažia čo najskôr zneškodniť nepriateľa. Z toho dôvodu dokážu rýchlo zneškodniť aj výkonnejšie a lepšie manévrovateľné lietadla. Ak je nepriateľom lepšie manévrovateľné lietadlo, tak pri dvojitom útoku trvá dlhý čas a výmen rolí, kým mu vyčerpajú dostatok energie. Pričom pri použití *Loose deuce* sa dá takéto lietadlo zneškodniť už behom prvého zatočenia lietadla. Čo sa defenzívy týka, tak pri boji proti jednému lietadlu sú na tom *Loose deuce* aj dvojitý útok rovnako. Pri príchode ďalšieho lietadla má ale dvojitý útok lepšie vlastnosti, pretože voľné lietadlo sa viac sústreďuje na monitorovanie prostredia a je väčšia šanca, že si skôr všimne prichádzajúceho nepriateľa, a tým sa dostane do vhodnejšej pozície na obranu. Avšak v zónach, kde sa dá predpokladať príchod ďalších nepriateľov neexistuje presná výhoda ani jednej z doktrín, pretože *Loose deuce* dokáže zneškodniť nepriateľa skôr a možno pred tým, ako sa objaví ďalší. Je vhodné používať *Loose deuce* doktrínu v oblastiach s nízkym až stredným rizikom stretu s nepriateľom a pri vysokom riziku prejsť na doktrínu dvojitého útoku.

Ďalším kritickým bodom tejto doktríny je komunikácia. Bojujúci pilot by mal svojmu partákovi hlásiť možnosti zámény rolí, ale aj pozíciu, do ktorej sa snaží protivníka dostať. Voľný pilot má na druhú stranu lepší rozhľad nad súbojom a mal by bojujúcemu pilotovi



Obr. 4.2: Útočný manéver voľného lietadla pri doktríne Loose deuce [12]

radiť, ako by mohol ďalej manévrovať. Okrem týchto informácií by mal voľný pilot hlásiť defenzívne manévry pri prepadnutí ďalším nepriateľom. Dôležitá informácia, ktorú by si piloti mali hlásiť je aj ich rola, pretože v niektorých situáciách nemusí byť jasné, ktoré lietadlo je bojujúce a ktoré je voľné. V prípade nehlásenia tejto informácie sa môžu lietadlá dostať do situácie, že si oba myslia, že sú bojujúce a vo výsledku sa blokovať v manévroch a zbytočne strácať energiu.

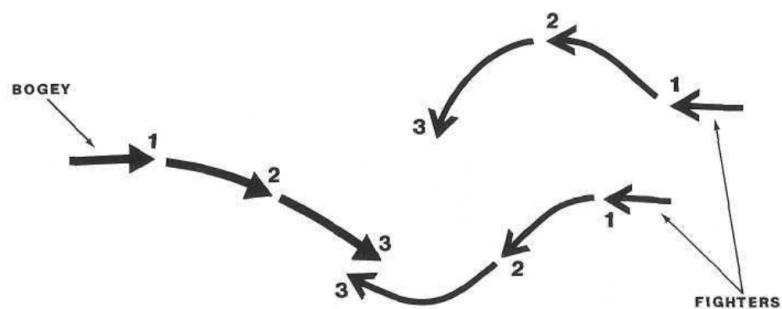
4.2 Bojové manévry

Lietanie vo formáciách a poznanie svojich úloh v nich je pre súboje letiek potrebné, ale pre úplnú spoluprácu lietadiel v letke sú potrebné ešte bojové manévry. Tieto manévry sa používajú najmä pri začiatku a konci súboja, pretože to sú najpredvídateľnejšie a najviac vyskytované situácie počas súbojov. Všetky manévry z tejto podkapitoly sú taktiež čerpané z knižky o leteckých súbojoch od pána Shaw-a [12].

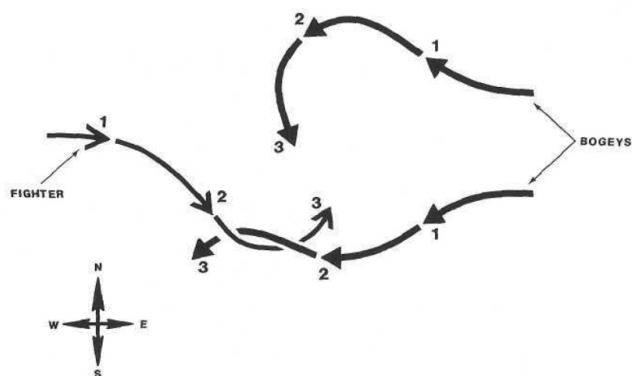
4.2.1 Zátvorka (Bracket)

Jeden z najrozšírenejších a najjednoduchších manévrov je takzvaná *zátvorka*, ktorý sa používa ak sa letka čelne stretne s osamoteným nepriateľom. V tomto manévri sa lietadlá letky snažia obklúčiť nepriateľa tým, že sa rozostúpia. Tým nepriateľa donúti vybrať si jedno lietadlo, na ktoré zaútočí. Tento manéver je možné vidieť na obrázku 4.3. Keď si nepriateľ vyberie lietadlo, na ktoré sa bude sústrediť, tak sa toto lietadlo stane bojujúcim a druhé lietadlo sa snaží dostať do pozície podľa toho, akou doktrínou sa riadi. Ak si nepriateľ nevyberie ani jedno lietadlo a iba popri nich preletí, tak sa lietadlo jednoducho otočia, a tým sa dostanú do súperovej zadnej hemisféry, ktorá je ideálna na útok.

V prípade obrane proti zátvorke by si lietadlo malo vybrať stranu, na ktorú prudko zatočí, ale bez mŕňania energie. Pri tejto zatáčke sa snaží dostať mimo zátvorky. Lietadlo by si malo vybrať stranu bližšieho nepriateľa. Pri takomto pokuse bude musieť nepriateľ na vybratej strane začať prudšie točiť, a tým sa vzdalovať od svojho partáka. Hneď ako si to



Obr. 4.3: Manéver zátvorky [12]

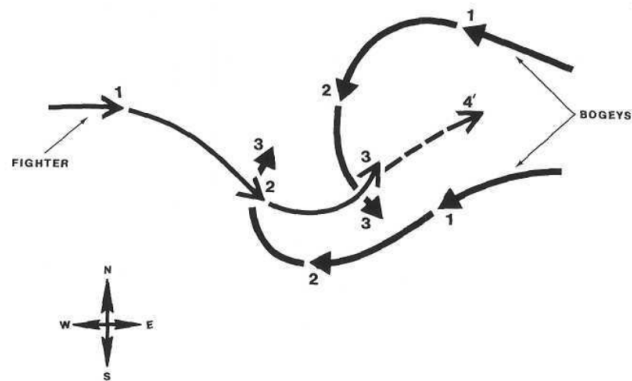


Obr. 4.4: Obrana proti manévru zátvorky [12]

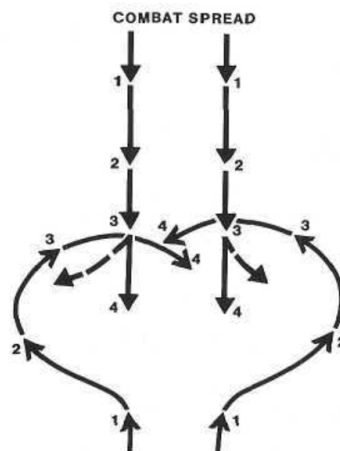
parták všimne, mal by začať točiť smerom ku vybranému lietadlu. V určitom momente by malo obraňujúce sa lietadlo zmeniť smer a začať letieť proti partákovi, čím budú lietadlá letieť od seba, a to poskytne obraňujúcemu lietadlu čas a priestor na únik. Práve otočka proti partákovi je najnebezpečnejšou časťou tohto manévru, pretože pri zlom odhade okamihu na začiatok otočky sa parták môže dostať do vhodnej streleckej pozície. Z tohto dôvodu je nutné mať partáka stále na dohľad a korigovať manéver podľa jeho pozície a v prípade nebezpečnej pozície vykonať ešte obranný manéver. Možný priebeh obranného manévru je možné vidieť na obrázku 4.4. Pri správnom vykonaní tohto manévru si oba nepriateľské lietadlá môžu myslieť, že sú bojujúce a ak začnú točiť do rovnakej strany, tak nebudú mať vhodnú vzájomnú podporu. Táto obranná taktika ale nemusí fungovať na dobre zkoordinované letky, pretože voľný pilot môže zareagovať skoro a pilot vybraného lietadla nemusí dovoliť únik zo zátvorky, v takom prípade sa obraňujúce lietadlo musí ďalej brániť, ale aspoň na chvíľu si získa čas na súboj jeden na jedného. Takáto situácia je zobrazená na obrázku 4.5

4.2.2 Zátvorka letky

Manéver zátvorky sa dá použiť taktiež v bojoch medzi letkami, ale dochádza v ňom k mier-
nim modifikáciám. Za prvé, sa letka musí začať rozdeľovať skôr, pretože musia v rozdeľovaní
predbehnúť nepriateľskú letku. Ak by sa obe letky začali rozdeľovať rovnako a snažili tú
druhú predbehnúť, tak sa boj rozdelí a letci by sa mohli stratiť z dohľadu. Druhá dôležitá
časť manévru je zakončenie. Pri zakončovaní jednoduchej zátvorky sa oba lietadlá sústredili



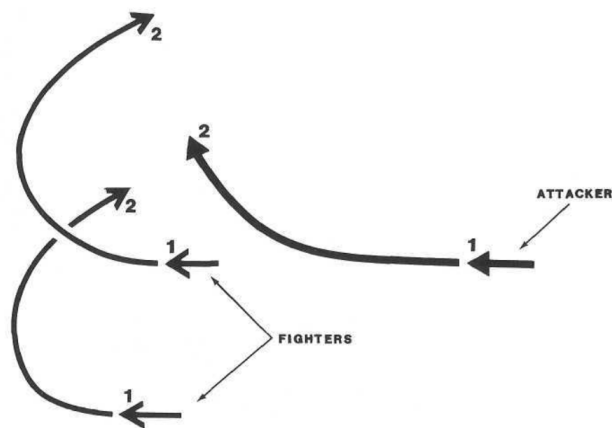
Obr. 4.5: Neúspešná obrana proti manévru zátvorky [12]



Obr. 4.6: Zátvorka letky [12]

na jedného nepriateľa a útok viedlo lietadlo s lepšou pozíciou. Avšak pri zátvorke letky sa po dokončení zátvorky lietadlá sústreďujú vždy na jedno lietadlo, a to je to vzdialenejšie, čiže útočia na nepriateľa, ktorý bol na počiatku bližšie k partákovi. Tento prípad je možné vidieť na obrázku 4.6.

Z faktu, že lietadlá útočia na nepriateľov do diagonály plynie, že sa lietadlá musia v určitom momente prekrížiť. Tento moment nastáva pri konci manévru a vyžaduje vysokú mieru koordinácie medzi lietadlami. Po zvládnutí prekríženia lietadlá začnú útočiť na nepriateľov. Dôvod prekríženia je najmä vhodnejšia vzdialenosť na útok, a tým, že je nepriateľ vzdialenejší, tak lietadlo nie je nútené prudko zatačať a môže použiť miernejšiu zatačku, pri ktorej si lietadlo udržiava energiu. Ďalšia výhoda prekríženia vyplýva z ľudskej psychiky, a to je fakt, že pilot nepriateľského lietadla sa cíti viac ohrozený lietadlom, ktoré je bližšie k nemu, a tým pádom, keď sa dostane do zátvorky, tak začne točiť k bližšiemu súperovi, čiže ďalej od partáka. Ale pri tomto točení iba pomáha nepriateľovi tak, že vzdialenejšiemu súperovi prenecháva vzácne uhly na útok. Túto možnosť je taktiež možné vidieť na obrázku 4.6 a trajektória lietadiel je zobrazená prerušovanou čiarou.



Obr. 4.7: Sendvič [12]

4.2.3 Sendvič

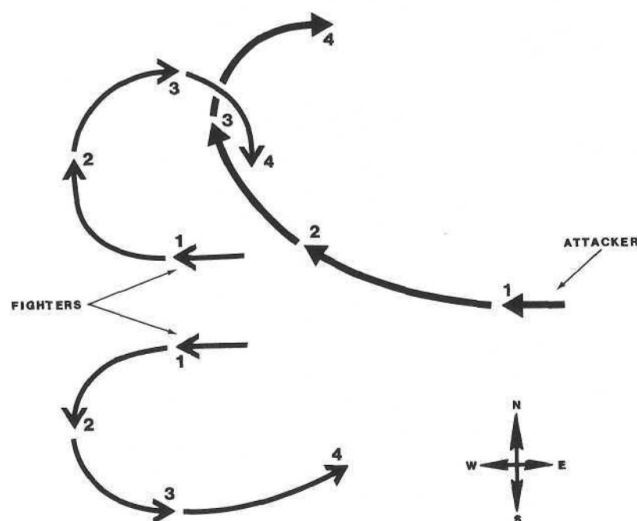
Ďalší z manévrov sa nazýva *sendvič* a je to obranný manéver letky. Používa sa najmä, ak sa osamotený nepriateľ dostal do zadnej hemisféry letky a snaží sa na ňu zaútočiť. Táto situácia je znázornená na obrázku 4.7. Pri použití tohto manévru si letci musia byť istý, na ktoré lietadlo sa snaží nepriateľ zaútočiť. Ohrozené lietadlo, v tomto prípade horné, zatočí smerom od svojho partáka. Pilot voľného lietadla počká, či nepriateľ naozaj nasleduje druhé lietadlo a po chvíli zatočí do toho istého smeru. Týmto manévrom sa pilot voľného lietadla môže dostať do útočnej pozície a nepriateľa zneškodniť. Tento manéver je ideálna obrana proti napadnutiu, ale dá sa použiť iba ak je zrejmé, na ktoré lietadlo nepriateľ útočí. Ak tento fakt nie je známy, je lepšie použiť *defenzívne rozdelenie* popísané v ďalšej podkapitole 4.2.4. Toto rozlíšenie je ľahšie, čím sú od seba lietadla letky vzdialenejšie.

4.2.4 Defenzívne rozdelenie

Defenzívne rozdelenie je ďalší obranný manéver pri útoku osamoteného nepriateľa zo zadnej hemisféry. Na rozdiel od sendviču sa dá použiť kedykoľvek a po jeho použití si nepriateľ musí vybrať, na ktoré lietadlo začne útočiť. Manéver pozostáva z otočky oboch lietadiel smerom od seba, pričom aj nepriateľ musí zatočiť na jednu stranu, a tým pádom stratiť druhé lietadlo z očí. Ak je nepriateľ ďaleko, môžu byť tieto otočky mierne, pre zachovanie energie. Lietadlo, ktoré je prenasledované nepriateľom sa dostáva do defenzívy a vo väčšine prípadom sa musí brániť aj nepriateľskej palbe, kým jeho parták nie je schopný zaútočiť na nepriateľa. Defenzívne lietadlo by malo ďalej pokračovať v otočke, ak ho nepriateľ nezneškodnil, a donútiť nepriateľa prestreliť. Popísaný manéver je možné vidieť na obrázku 4.8. Existuje ešte jedna modifikácia tohto manévru, a to taká, že sa lietadla rozdelia vo vertikálnej osi a poletia jedno hore a jedno dole. Avšak oba tieto manévry sú nebezpečné a často poskytujú nepriateľovi priestor na strelbu, preto by sa mali používať iba v nevyhnutných prípadoch.

4.2.5 Polovičné rozdelenie

Existuje ešte jeden defenzívny manéver, ktorý kombinuje *sendvič* a *defenzívne rozdelenie* a tento manéver sa nazýva *polovičné rozdelenie*. Pri tomto manévri jedno z lietadiel zatočí prudko od svojho partáka, pričom druhé lietadlo pokračuje ďalej v lete alebo sa mierne



Obr. 4.8: Defenzívne rozdelenie [12]

natočí k točiacemu lietadlu, aby ho nestratilo z dohľadu. Výsledkom manévru je, že sa nepriateľ musí rozhodnúť, na ktoré lietadlo bude útočiť a z dôvodu smerovania lietadiel od seba uvoľní manévrovací priestor obom lietadlám.

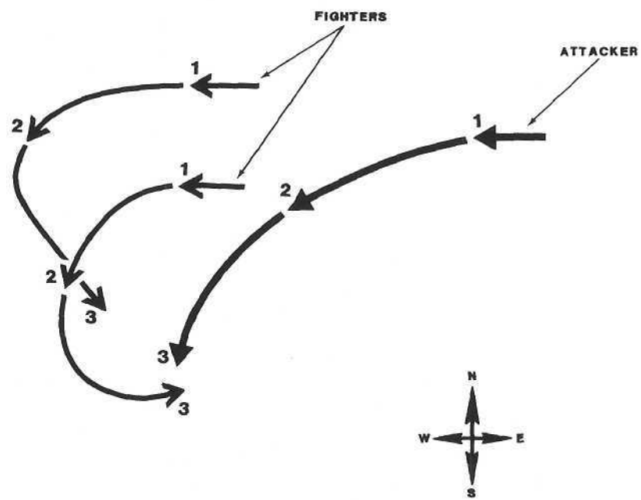
Pri tomto manévri môžu nastať dve rôzne situácie, ako sa nepriateľ zachová. Za prvé začne útočiť na točiace lietadlo. V tom prípade točiace lietadlo, ktoré točí prudkou ale energiu nemíňajúcou trajektóriou, pritiahne zatačku, a tým pádom znemožní nepriateľovi strieľať. Súčasne s tým pilot voľného lietadla prudko zatočí a dostane sa tým do vhodnej útočnej pozície. Túto situáciu je možné vidieť na obrázku 4.9.

Druhá možnosť je, že nepriateľ začne útočiť na pokračujúce lietadlo. V tomto prípade pilot točiaceho lietadla začne točiť do opačnej strany, naspäť k svojmu partákovi, ktorý stále pokračuje v pôvodnom smere letu. Toto pokračovanie donúti nepriateľa pokračovať a umožní voľnému lietadlu dostať sa do palebnej pozície.

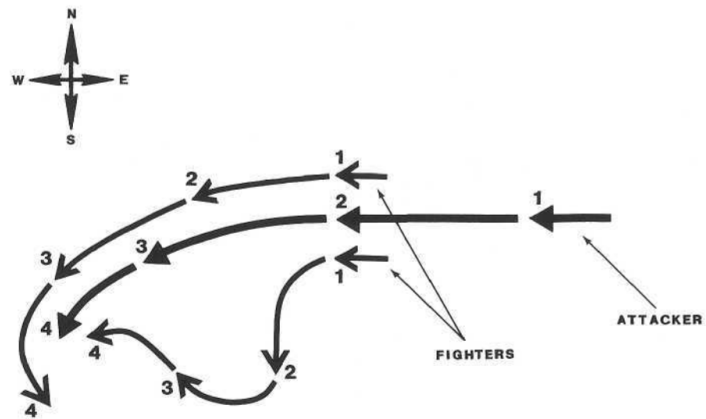
V prípade, že máme osamotené lietadlo, ktoré sa snaží napadnúť letku, ktorá využije manéver polovičného rozdelenia, najvhodnejší postup je spôsobiť čo najväčší zmätok a z boja ujsť. Takýto zmätok sa dá spôsobiť, tým, že najprv napadne jedného nepriateľského pilota a ako náhle začne napadnutý nepriateľ robiť obranné manévry a začne smerovať od svojho partáka, vtedy zmeniť cieľ na druhého nepriateľa. V tej chvíli je možné útočiť aj na druhého nepriateľa a jeho parták mu nemôže vôbec pomôcť, pretože letí úplne opačným smerom. Pri správnom vykonaní všetkých krokov a troške šťastia je osamotené lietadlo schopné zneškodniť oboch nepriateľov. Avšak aj ak sa osamotenému lietadlu nepodarí zneškodniť ani jedného nepriateľa, tak zanechá oboch nepriateľov smerujúcich proti sebe, čo dáva osamotenému lietadlu dostatok času na únik. Túto situáciu je možné vidieť na obrázku 4.11.

4.2.6 Thatchovo pretkávanie

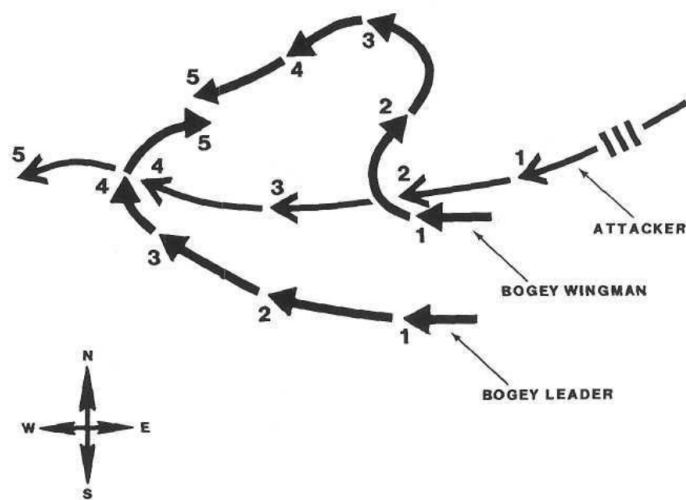
Jeden z menej používaných obranných manévrov je aj *Thatchovo pretkávanie* (Thatch weave). Tento manéver sa používal najmä pri lietadlách vybavených guľometmi a pri moderných navádzaných strelách neposkytuje až tak veľké taktické výhody. Pre vykonanie tohto manévru by mali byť oba obraňujúce sa lietadla dostatočne vzdialené od seba. Následne oba lietadla prudko zatočia smerom k sebe. Ak sa pri tomto manévri snaží útočník ďalej



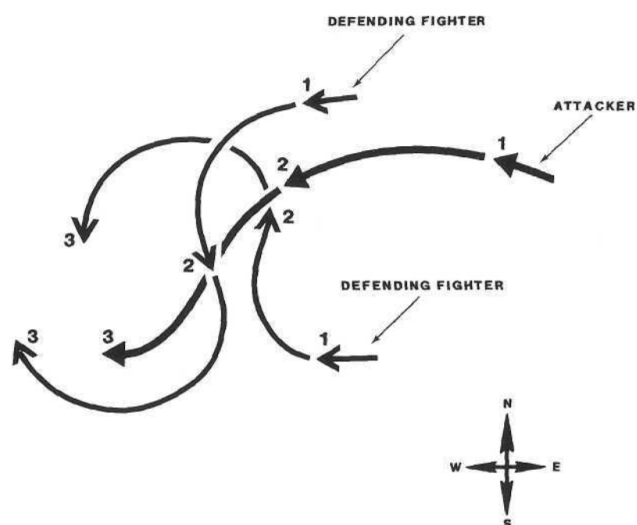
Obr. 4.9: Polovičné rozdelenie a nepriateľ útočí na točiace lietadlo [12]



Obr. 4.10: Polovičné rozdelenie a nepriateľ útočí na pokračujúce lietadlo [12]



Obr. 4.11: Protifah pri polovičnom rozdelení [12]



Obr. 4.12: Thatchovo pretkávanie [12]

útočiť na jedno z lietadiel, dostane sa do palby od voľného lietadla, pričom sa ale čelne stretávajú. Ak nepriateľ pokračuje v útoku, je možné vykonať ďalšiu otočku a tento proces opakovať. Popísaná situácia je zobrazená na obrázku 4.12. Tento manéver je ale vhodný len za predpokladu, že obraňujúce lietadlo má väčšiu palebnú silu a lepšiu rýchlosť otáčania.

Kapitola 5

Implementácia

Letecké súboje sú komplikovaný problém, pri ktorom sa ťažko overuje správnosť. Trénovanie bojových pilotov je preto drahé a ak sa chce človek stať bojovým pilotom, musí mať odlietané stovky až tisícky hodín. Avšak ani začínajúci bojový piloti netrénujú hneď v lietadlách, ale začínajú v simulátoroch. Simulácia je najlacnejšie riešenie pre trénovanie pilotov. Z tohto dôvodu má aj výstup môjho projektu formu simulácie leteckých súbojov. Na takejto simulácii je možné overiť, že lietadlá sú schopné proti sebe bojovať a taktiež, že lietadlá vykonávajú manévry, ktoré sú v leteckých súbojoch zaužívané.

5.1 Použité nástroje

Keďže je zbytočné znovu objavovať koleso, tak ani môj projekt sa nezaobišiel bez použitia už vytvorených nástrojov.

Jason

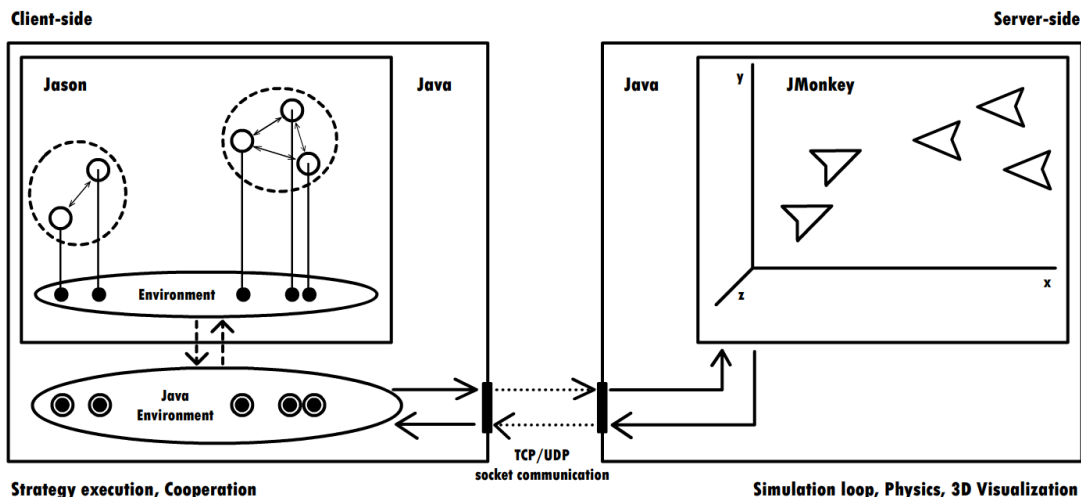
Prvým z nástrojov, ktoré som použil, je už spomínaný *Jason*¹. Jason je agentne orientovaný jazyk založený na BDI logike a je to dialekt jazyka *AgentSpeak*. Presnejšie povedané Jason je nielen jazyk, ale aj interpret jazyka *AgentSpeak*. Tento jazyk som si zvolil, pretože BDI logika sa mi zdala ako vhodný model rozhodovania pilotov pri leteckých súbojoch. Podobne ako agenti založený na BDI logike, majú piloti zámery, túžby a predstavy. V prípade pilotov je túžbou poraziť nepriateľa, zámer je vykonať správny manéver v správnej chvíli a predstavy o okolí sú vnemy pilota. Presne takto isto fungujú aj agenti založený na BDI logike.

Simulátor

Keďže rovnakým problémom ako ja sa už zaoberal pán Radek Burda vo svojej diplomovej práci [4], vytvoril pre letecké súboje simulátor založený na hernom engine *JMonkey*². Ja som tento simulátor taktiež vo svojej práci použil. Engine *JMonkey* je taktiež ako interpret Jason napísaný v jazyku *Java*, a preto nie je problém komunikácie medzi týmito dvoma komponentami. Po spojení týchto komponentov, vznikla celková architektúra systému, ktorú je možné vidieť na obrázku 5.1.

¹<http://jason.sourceforge.net/wp/>

²<http://jmonkeyengine.org/>



Obr. 5.1: Celková architektúra projektu [4]

5.2 Agentný systém

Po zvolení požadovaných nástrojov sa mohla začať hlavná časť práce na projekte, a to implementácia. Snažil som sa, aby implementovaní agenti boli schopní komunikovať podobne, ako komunikujú piloti pri bojových akciách a prípadný útok na nepriateľa alebo obranu pred nepriateľom skoorinovali. Pri dobrej koordinácii by mali byť agenti schopní používať vhodné manévry, a tým pádom rýchlejšie poraziť nepriateľa pri útoku a ubrániť sa nepriateľovi, v lepšom prípade dokonca zneškodniť nepriateľa pri obrane.

Na to, aby bol agent schopný sa rozhodovať, musí vnímať svoje okolie. V mojej implementácii agent vníma podobné vnemy, ako agenti pána Radka Burdy [4], a to napríklad, v akom tíme sú agenti, akú majú vzdialenosť a uhol od chvosta od ostatných agentov a aspekt voči ostatným agentom. Tieto vnemy dostáva agent s každým simulačným krokom systému a na ich základe sa rozhoduje, aké manévry využije. Ja som tieto vnemy rozšíril ešte o informáciu o polohe tímového agenta vzhľadom na agenta, a to, či sa nachádza na pravej či ľavej strane. Táto informácia je dôležitá na vykonávanie tímových manévrov a aj v reálnom leteckom súboji piloti vedia, na ktorej strane majú svojho spojenca. Táto informácia sa však nedá zistiť z uhlu od chvosta ani z aspektu, preto bola pridaná ako osobitný vnem.

Po vyhodnotení vnemov sa agenti snažia splniť svoje zámery. Tieto zámery môžu splniť vykonávaním akcií, ktoré im systém umožňuje. V práci Radka Burdy im systém umožňoval vykonávať akcie potrebné na súboj jeden proti jednému, a to menovite vedúcu krivku, rýdzu krivku, zaostávajúcu krivku, vysoké jojo, vertikálne nožnice a strelbu. Ja som tieto akcie rozšíril ešte o možnosť zatočenia, v ktorej si agent vyberie na ktorú stranu chce zatočiť. Táto akcia má tvar `turn(Direction)`, kde premenná *Direction* môže byť nahradená textovým reťazcom *right*, ak chce agent zatočiť do pravej strany alebo textovým reťazcom *left*, ak chce agent zatočiť do ľavej strany. Ďalšia doplnená akcia je rozťahnutie letovej formácie, ktorá má tvar `spread_out(Direction, Width, Enemy)`. Táto akcia sa používa, keď sa agent chce dostať vedľa nepriateľského lietadla, a to najmä pri manévroch zátvorkovania. V akcii sa používa smer rozširovania podobne ako pri akcii zatáčania, ďalej požadovaná horizontálna vzdialenosť medzi agentom a nepriateľom. Táto vzdialenosť sa udáva v metroch a je

parametrizovaná parametrom *Width*. A v neposlednom rade je akcia určená nepriateľom, ktorého sa snaží agent obklúčiť.

5.3 Tímový agent

Keď už máme popísané letecké taktiky a manévry, ktoré agenti potrebujú na vzdušný súboj letiek, a zároveň poznáme aj prostredie, v ktorom sú títo agenti umiestnení, môžeme popísať, ako vyzerajú jednotliví agenti.

Pri implementácii agentov som sa inšpiroval doktrínou *Loose deuce*, pretože sa mi zdala najvhodnejšia pre prostredie kontrolovaných leteckých súbojov. Doktrínu *Bojové krídlo* som vylúčil hneď, pretože pri používaní tejto doktríny jedno lietadlo lieta nad súbojom a súboj je vedený formou jeden na jedného, čo by neprinieslo nič zaujímavé do projektu. Doktrína *Dvojitý útok* je veľmi podobná doktríne *Loose deuce*, ale počas súboja sa druhé lietadlo tiež drží v úzadí a kontroluje okolie pred ďalšími nepriateľmi. Pri používaní doktríny *Loose deuce* sa však do súboja zapájajú obe lietadlá a snažia sa výrazne znížiť čas potrebný na súboj. Aj z tohto dôvodu som si zvolil túto doktrínu a zisťoval som, či sa naozaj zmení dĺžka súboja k lepšiemu.

5.3.1 Rozhodovanie agenta

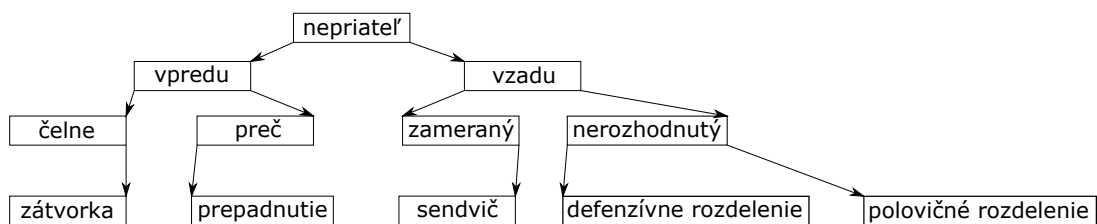
Najdôležitejšia časť leteckých súbojov je vhodné rozhodovanie, a preto výber taktiky agenta má veľký podiel na výsledku celého súboja. V mojom prípade sa toto rozhodovanie odohráva iba na strane veliteľa letky, ktorý sa rozhodne, ktorá taktika sa bude vykonávať a následne prikáže svojmu partákovi, aby sa riadil vybranou taktikou. Aby sa však veliteľ mohol správne rozhodnúť, musí s ním parták komunikovať, preto mu v každom kroku simulácie parták pošle, v akej vzdialenosti sa nachádza od nepriateľov.

Hlavná časť rozhodovanie závisí na pozícií nepriateľov, a to najmä, či sa nachádzajú pred alebo za lietadlom. Ak sa nepriatelia vyskytujú pred lietadlom a lietadlá letia čelne proti sebe, tak je jediná možná použiteľná taktika zátvorkovanie. Ak je nepriateľ pred lietadlom, ale letí tým istým smerom ako lietadlá, čiže preč od lietadiel, tak je vhodnou taktikou prepadnutie.

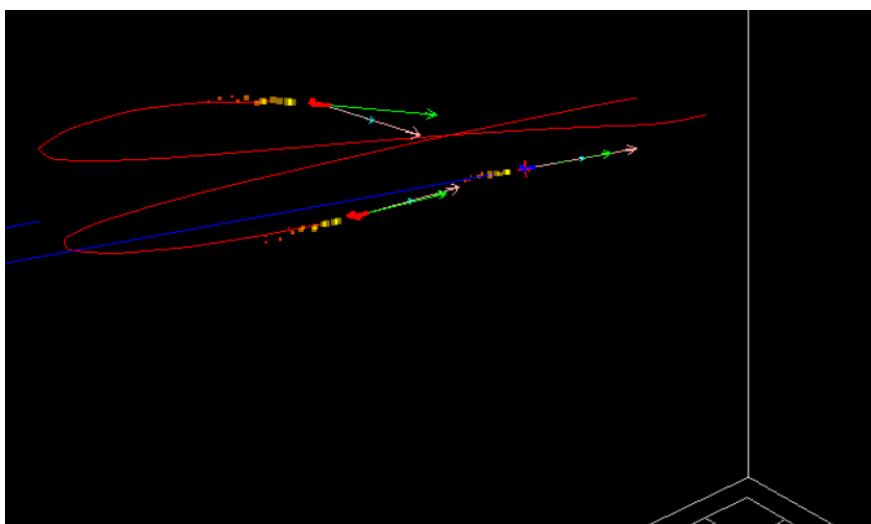
Ak sa však nepriateľ vyskytuje za lietadlami, je potrebné sa brániť. V tomto prípade ak je letka napádaná nepriateľskou letkou, tak môžu lietadlá použiť defenzívne rozdelenie a iba dúfať, že sa nepriateľ nedostane do vhodnej palebnej pozície a následne sa súboj rozpadne na dva súboje jeden na jedného. Ak je však letka napádaná osamoteným lietadlom, tak je možné použiť tri taktiky. Ak je z napádajúceho lietadla zrejmé, na ktoré lietadlo chce zaútočiť, tak je najefektívnejšie použiť taktiku sendviča, čím sa jedno lietadlo dostane do útočnej pozície a je schopné rýchlo zneškodniť nepriateľa. Ak však nie je zrejmé, kto je nepriateľov cieľ, je vhodné použiť defenzívne rozdelenie alebo polovičné rozdelenie. Po zvážení všetkých týchto faktov je možné vytvoriť rozhodovací strom pre agenta, ktorý je možné vidieť na obrázku 5.2.

5.3.2 Implementácia taktík

Keď sa už veliteľ rozhodne, ktorú taktiku by bolo najvhodnejšie použiť, tak zavelí svojmu partákovi, aby začal vykonávať danú taktiku. Zároveň s tým túto taktiku začne vykonávať aj veliteľ. V tejto časti vysvetlím, ako som implementoval jednotlivé taktiky a zhodnotím,



Obr. 5.2: Rozhodovací strom tímového agenta



Obr. 5.3: Využitie taktiky prepadnutia

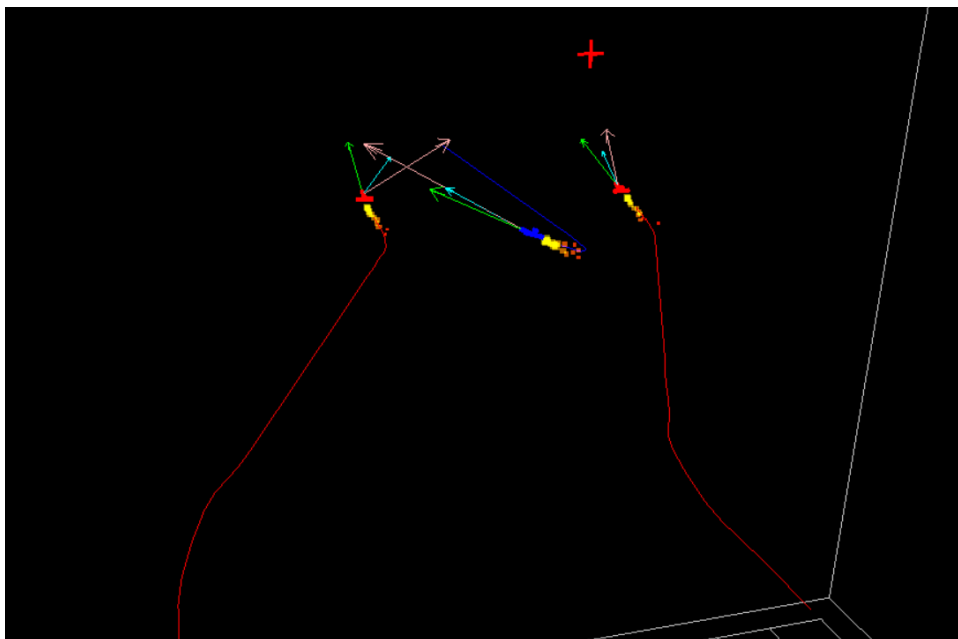
aký dôsledok malo použitie taktiky v porovnaní s používaním taktík boja jednotlivcov v skupinovom boji.

Prepadnutie

Jedna z najjednoduchších taktík je prepadnutie, ktorá sa používa, keď letka napáda nepriateľské lietadlo zozadu. Pri tejto taktike sa jedno lietadlo snaží vytvoriť tlak na nepriateľa tým, že normálne útočí, kým druhé lietadlo si získa pozíciu vystúpaním nad nepriateľské lietadlo a následným útokom zhora.

V mojom prípade, keď sa veliteľ rozhodne použiť túto taktiku, tak on sám začne pôsobiť útočný tlak a iniciuje súboj jeden na jedného a parťákovi prikáže získať pozíciu. Parťák získa pozíciu nad nepriateľom použitím manévru vysokého joja a následne zaútočí. Využitie tejto taktiky v prostredí simulátora je možné vidieť na obrázku 5.3.

Testovaním tohto scenára pri použití taktík jeden na jedného som zistil, že lietadlá sú schopné zneškodniť napadnutého nepriateľa v priemere za 100 interpretačných cyklov. Táto hodnota je spôsobená najmä vzdialenosťou medzi lietadlami a 100 cyklov je približne čas potrebný lietadlami na dostihnutie nepriateľa. Pri použití taktiky prepadnutia sa tento čas nijako značne nelíši, pretože lietadla zneškodnia nepriateľa pár cyklov po dostihnutí, podobne ako aj pri bojoch jednotlivcov. Konfiguráciu agentného systému pre tento experiment je možné nájsť v súbore *loose_deuce_configuration.mas2j*.



Obr. 5.4: Využitie taktiky zátvorky pri súboji proti jednému nepriateľovi

Zátvorka

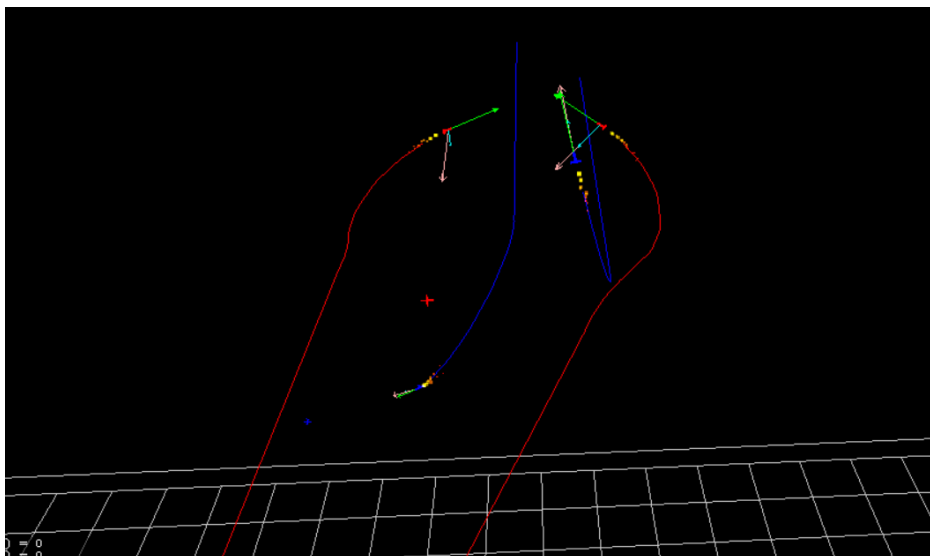
Ďalšou taktikou používanou pri polohe nepriateľov pred lietadlami je zátvorkovanie. Pri tejto taktike sa rozlišuje, či lietadlá letia proti jednému nepriateľovi alebo letke, pretože sa líši ukončenie manévru a začiatok útoku.

V mojej implementácii taktiky zátvorky proti jednému lietadlu si oba lietadlá zistia, na ktorej strane od partáka sa nachádzajú a začnú rozťahovať formáciu na opačnú stranu tak, aby dostali nepriateľa medzi seba. Keď dostanú nepriateľa medzi seba, tak začnú oba lietadlá točiť smerom ku nepriateľovi, a tým pádom nezáleží, do ktorého smeru sa nepriateľ rozhodne ísť, pretože vždy jeden z nich získa výhodnú pozíciu. Takúto situáciu je možné vidieť na obrázku 5.4.

Pri využívaní taktík súboja jednotlivcov takýto súboj trvá od 150 do 250 interpretačných cyklov. Avšak pri použití taktiky zátvorkovanie sa dĺžka súboja zníži na 130 až 180 interpretačných cyklov. Z tohto výsledku je možné pozorovať, že použitie zátvorky pri napádaní čelne letiaceho nepriateľa je vážne vhodné, pretože nepriateľovi znemožňuje únik. Konfiguráciu agentného systému, ktorý bol použitý pre tento experiment je možné nájsť v súbore *small_bracket_configuration.mas2j*.

Pri použití zátvorky pri letke sa na rozdiel od jednoduchšej zátvorky manéver končí zatočením oboch lietadiel do vnútra a každé lietadlo následne útočí na vzdialenejšieho nepriateľa, čiže útočí na nepriateľa, ktorý je bližšie ku partákovi. Vďaka tomuto sa lietadlo dostane do zadnej časti nepriateľa, kde môže jednoducho reagovať na zmenu smeru nepriateľa. Z dôvodu útoku každého lietadla na iného nepriateľa sa súboj rozpadne na dva súboje jeden na jedného. Až keď sa jednému lietadlu podarí zneškodniť nepriateľa, prichádza pomôcť svojmu partákovi. Situáciu po použití zátvorky proti letke je možné vidieť na obrázku 5.5.

Experimentovanie s touto taktikou bolo náročné, a to najmä z dôvodu nekonzistencie súbojov. Pri experimentovaní sa stávalo, že si letky navzájom zostrelili po jednom lietadle a výsledky sa ťažko porovnávali. Preto som experiment pozmenil a testoval letku proti



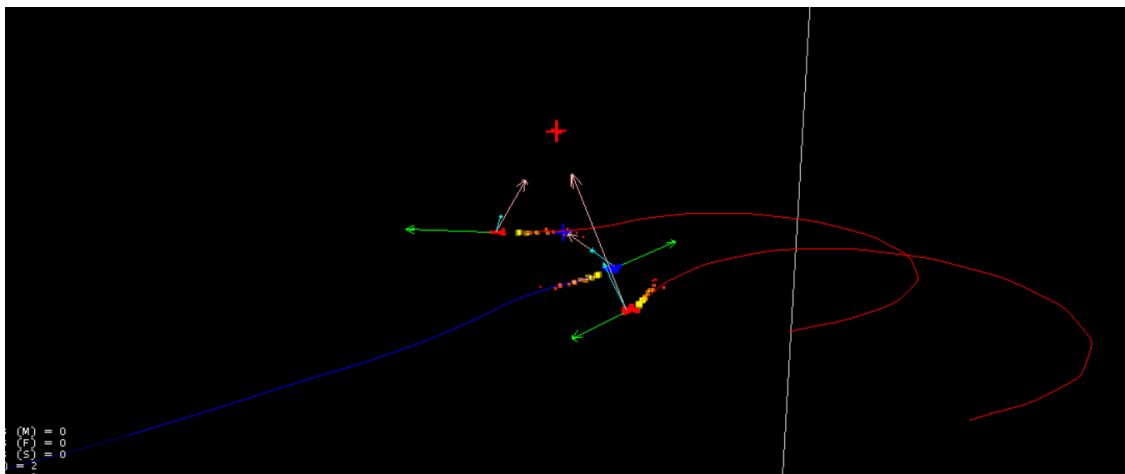
Obr. 5.5: Využitie taktiky zátvorky pri súboji proti letke

náhodne sa pohybujúcej letke. V tomto prípade sa lietadlám bojujúcim taktikami jednotlivcov podarilo prvého nepriateľa poraziť približne za 200 interpretačných cyklov, druhý nepriateľ bol porazený až keď ho dostihlo druhé lietadlo. Pri využití manévru zátvorky bol čas zneškodnenia prvého nepriateľa dosť variabilný a pohyboval sa od 150 interpretačných cyklov až po 230 interpretačných cyklov. Avšak pri použití manévru zátvorky v tomto prípade prinieslo jednu výhodu, a to fakt, že oba lietadlá sa dostali do vhodnej útočnej pozície nepriateľa. Konfiguračný súbor z tohto experimentu je možné nájsť v súbore *big_bracket_configuration.mas2j*.

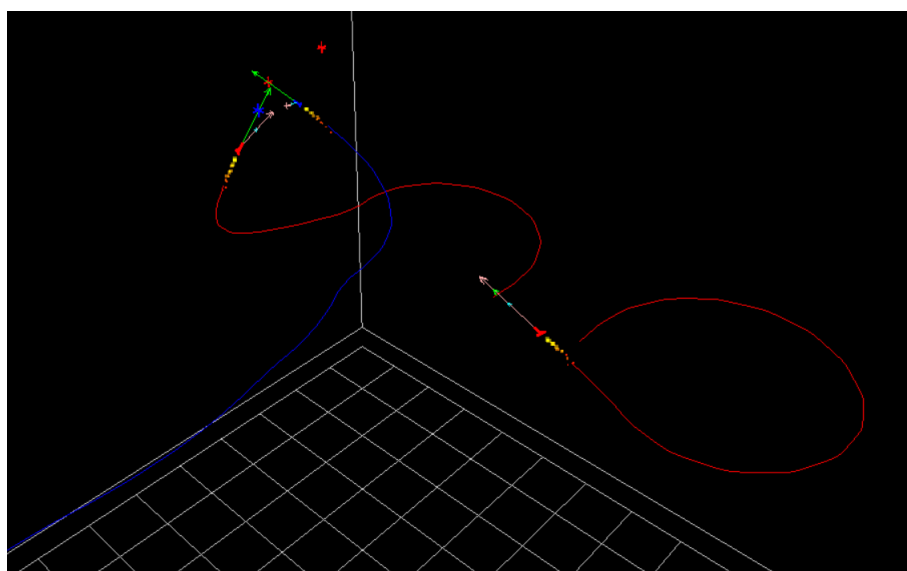
Sendvič

Doposiaľ som rozoberal iba útočné manévry, ktorých cieľom bolo rýchlejšie zneškodnenie nepriateľov, a tým pádom skrátenie dĺžky boja. Teraz však prechádzam na defenzívne manévry, ktoré sa taktiež snažia skrátiť súboj, ale bez strát lietadiel. Prvým z týchto manévrov je sendvič. Sendvič pozostáva z otočky oboch lietadiel do smeru, v ktorom sa nachádza napádané lietadlo. Čiže ak sa nepriateľ rozhodol útočiť na ľavé lietadlo letky, tak celá letka zatočí doľava. Moja implementácia tejto taktiky pozostáva práve z toho, že sa predpokladá, že nepriateľ útočí na lietadlo, ku ktorému je bližšie, pretože to dáva taktický zmysel. Napokon, keď sa zistí, na koho nepriateľ útočí, obe lietadlá letky zatočia do správneho smeru. Znázornenie tejto taktiky v prostredí simulátoru je možné vidieť na obrázku 5.6.

Pri experimentovaní s týmto manévrom som zistil, že pri použití taktík jednotlivcov sa súboj buď dostane do vertikálnych nožníc medzi tromi lietadlami, ktoré sa neskončí ani po 800 interpretačných cykloch, alebo sa nepriateľovi podarí zostreliť jedno lietadlo z letky. Avšak pri použití taktiky sendviča sa letke vo všetkých prípadoch podarilo zneškodniť nepriateľa bez strát, a to v čase medzi 400 až 800 interpretačných cyklov. Z toho vyplýva, že taktika sendviča nielen chráni lietadlá pred zneškodnením, ale aj mierne skracuje dĺžku boja. Konfiguračný súbor agentného systému pre tento experiment je možné nájsť v *sandwich_configuration.mas2j*.



Obr. 5.6: Využitie obrannej taktiky sendvič

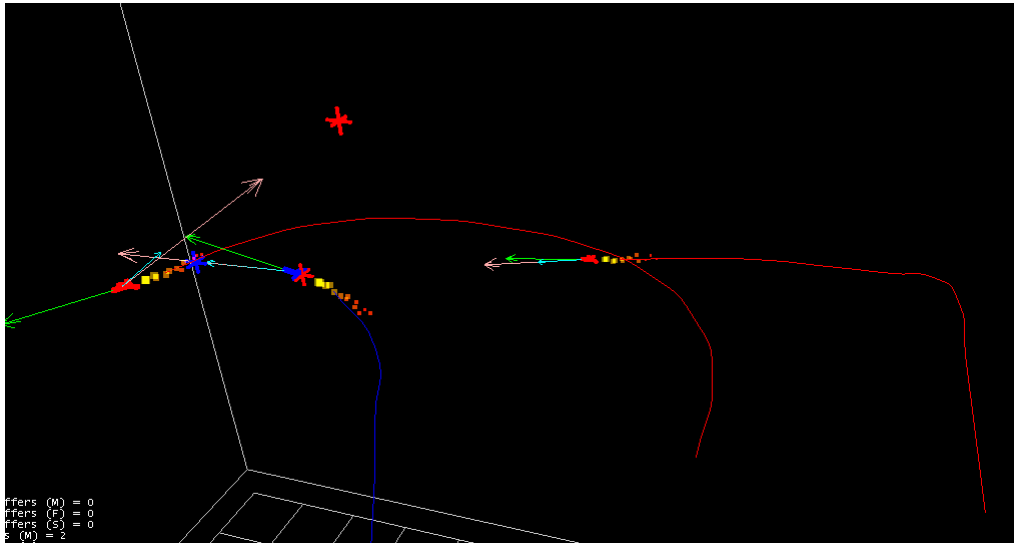


Obr. 5.7: Využitie defenzívneho rozdelenia pri obrane proti osamotenému nepriateľovi

Defenzívne rozdelenie

Ďalšia defenzívna taktika, ktorá sa na rozdiel od sendviča používa najmä keď letka nevie, na ktoré lietadlo nepriateľ zaútočí, je defenzívne rozdelenie. Pri tejto taktike zatočia oba lietadlá letky preč od svojho partáka, a tým donútia nepriateľa vybrať si cieľ. Jedno z lietadiel sa dostane do defenzívy, čo ale proti jednému lietadlu nevedí, pretože druhé sa dostane do útočnej pozície a môže nepriateľa zneškodniť. Moja implementácia funguje rovnako a keď sa zistí, že nepriateľ sa nachádza približne rovnako od oboch lietadiel, tak sa zaháji tento manéver. V simulačnom modeli je táto taktika znázornená na obrázku 5.7.

Čo sa týka experimentovania s taktikami pre boj jeden na jedného je táto situácia totožná s predchádzajúcou taktikou, pretože počiatočné podmienky pre obidve taktiky sú identické. Avšak pri experimentovaní s letkou používajúcou defenzívne rozdelenie som dosiahol poznateľne lepšie výsledky, keď tejto letke sa podarilo bez strát zneškodniť nepriateľa do 150 interpretačných cyklov. Podľa knihy od pána Shaw-a [12] je táto taktika mierne ne-



Obr. 5.8: Využitie polovičného rozdelenia pri obrane proti osamotenému nepriateľovi

bezpečnejšia ako sendvič, avšak ak pilot čaká, že naňho ide nepriateľ zaútočiť a začne sa včas brániť, tak si jeho parták dokáže získať lepšiu pozíciu na útok ako pri použití taktiky sendviča. Toto tvrdenie je podľa simulácie týchto taktík pravdepodobne pravdivé. Konfiguračný súbor tohto experimentu je možné nájsť pod názvom *defensive_split_configuration.mas2j*.

Polovičné rozdelenie

Posledná taktika, ktorú som implementoval je polovičné rozdelenie, pri ktorom sa jedno z lietadiel oddelí zatočením od partáka, a tým donúti útočníka vybrať si cieľ. Lietadlo, ktoré je pod útokom nepriateľa sa začne brániť a jeho parták sa zatiaľ dostane do útočnej pozície a nepriateľa zneškodní. Moja implementácia funguje rovnako, pričom točiacie lietadlo je vždy veliteľ letky a jeho parták je vždy pokračujúce lietadlo. Situácia, v ktorej bolo použité polovičné rozdelenie je zobrazená na obrázku 5.8, na ktorom je vidno, že nepriateľské lietadlo útočí na zatačajúce lietadlo, pričom pokračujúce lietadlo sa už dostáva do útočnej pozície.

Experimentovaním s agentmi, ktorí používali iba jednoduché taktiky som zistil, že sa útočiacemu nepriateľovi vždy podarilo zneškodniť aspoň jedno lietadlo, a to asi za 150 interpretačných cyklov. Avšak pri použití polovičného rozdelenia sa brániacim sa agentom podarilo ubrániť a približne za 150 interpretačných cyklov sa im podarilo zneškodniť útočiaceho nepriateľa. Čiže podľa experimentov je tento manéver podobne účinný ako defenzívne rozdelenie, ale použitie polovičného rozdelenia dáva útočníkovi menej času na súboj jeden na jedného. Konfiguráciu agentného prostredia pre tento experiment je možné nájsť v súbore *half_split_configuration.mas2j*.

Kapitola 6

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnuť a zostrojiť agentný systém, ktorý je schopný simulovať letecké súboje lietadiel. Preto sa v prvej časti tejto práce, a to kapitole 2 venujem agentne orientovanému programovaniu a pojmom agent a multiagentný systém. Popisujem v nej pojem agentnosti, čiže čo musí program spĺňať, aby sa mohol nazývať agentom. Ďalej v tejto kapitole rozoberám jeden typ agentov, a to BDI agentov. Popisujem, podľa čoho sa takýto agent rozhoduje a ako si modeluje prostredie, v ktorom sa nachádza. Taktiež tu popisujem agentne orientovaný jazyk AgentSpeak, ktorý sa používa práve pre realizáciu BDI agentov, a interpret tohto jazyka nazývaný Jason.

V druhej časti práce sa zaoberám termínmi používanými v letectve a najmä pri leteckých súbojoch. Medzi tri kľúčové termíny patria dosah, rýchlosť približovania a uhol od chvosta, pretože letecký súboj je v podstate snaha optimalizovať tieto tri parametre. Ďalej v tejto časti taktiež popisujem manévry, ktoré sa používajú v súbojoch jeden na jedného a ich dôsledky na tieto parametre. Súčasťou tejto časti sú aj letové formácie alebo doktríny používané pri zoskupení lietadiel do letiek. Pri letkách sa používajú odlišné bojové taktiky a manévry, preto aj tieto taktiky sú popísané v tejto časti.

V poslednej časti práce, a to kapitole 5, sa zaoberám implementáciou agentov, ktorí sú schopní medzi sebou komunikovať a koordinovane vykonávať taktiky letiek, ktoré sú popísané v kapitole 3. V tejto časti popisujem jednotlivé taktiky, podmienky, v ktorých sa dané taktiky majú vykonať a výsledky, ktoré chcú dané taktiky dosiahnuť. Ďalej pri tomto popise uvádzam aj experimenty zo simulácie daných manévrov a taktík a zhodnocujem, aký vplyv má použitie daných taktík na priebeh súboja. Z týchto experimentov som zistil, že použitie tímových taktík má naozaj kladný vplyv na dĺžku súboja a pri obranných manévroch sa lietadlá obraňujúcej sa letky naozaj ubránia bez strát.

Keďže sa táto práca zaoberala najmä komunikáciou medzi agentmi a implementáciou taktík letiek pre súboje dvaja na dvoch, tak by sa práca dala ešte rozšíriť o súboje celých oddielov, kde by jednotlivé letky dokázali komunikovať medzi sebou a koordinovať manévry pre splnenie komplexnejších cieľov ako by mohla byť ochrana určeného miesta alebo eskort lietadla. Tieto komplexné ciele by sa potom podobali klasickým leteckým misiám.

Literatúra

- [1] Bates, J.: The Role of Emotion in Believable Agents. *Commun. ACM*, ročník 37, č. 7, Júl 1994: s. 122–125, ISSN 0001-0782, doi:10.1145/176789.176803.
- [2] Bordini, R. H.; Hübner, J. F.; Wooldridge, M.: *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak Using Jason (Wiley Series in Agent Technology)*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007, ISBN 0470029005.
- [3] Bratman, M.: *Intention, Plans, and Practical Reason*. Center for the Study of Language and Information, 1987.
- [4] Burda, R.: *Inteligentní autopilot založený na agentně orientovaném programování*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2016.
URL <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/DP.php?id=14555>
- [5] CNATRA: *Flight Training Instruction, Basic Fighter Maneuvering (BFM), Advanced NFO T-45C/VMTS*. Texas: NAS Corpus Christi, 2018.
URL <https://www.cnatra.navy.mil/local/docs/pat-pubs/P-826.pdf>
- [6] Cohen, P. R.; Levesque, H. J.: Intention is choice with commitment. *Artificial Intelligence*, ročník 42, č. 2, 1990: s. 213 – 261, ISSN 0004-3702, doi:10.1016/0004-3702(90)90055-5.
- [7] Franklin, S.; Graesser, A.: Is It an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. In *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages*, editácia J. P. Müller; M. J. Wooldridge; N. R. Jennings, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997, ISBN 978-3-540-68057-4, s. 21–35.
- [8] Georgeff, M.; Pell, B.; Pollack, M.; aj.: The Belief-Desire-Intention Model of Agency. In *Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages*, editácia J. P. Müller; A. S. Rao; M. P. Singh, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, ISBN 978-3-540-49057-9, s. 1–10.
- [9] Rao, A. S.: AgentSpeak(L): BDI agents speak out in a logical computable language. In *Agents Breaking Away*, editácia W. Van de Velde; J. W. Perram, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996, ISBN 978-3-540-49621-2, s. 42–55.
- [10] Rao, A. S.; Georgeff, M. P.: Modeling Rational Agents Within a BDI-architecture. In *Proceedings of the Second International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR'91*, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1991, ISBN 1-55860-165-1, s. 473–484.

- [11] Rao, A. S.; Georgeff, M. P.: BDI Agents: From Theory to Practice. In *ICMAS*, 1995, s. 312–319.
- [12] Shaw, R.: *Fighter Combat: Tactics and Maneuvering*. Naval Institute Press, 1985, ISBN 9780870210594.
URL <https://books.google.cz/books?id=hBxBdKr0beYC>
- [13] Shoham, Y.: Agent-oriented Programming. *Artif. Intell.*, ročník 60, č. 1, Marec 1993: s. 51–92, ISSN 0004-3702, doi:10.1016/0004-3702(93)90034-9.
- [14] Shoham, Y.; Leyton-Brown, K.: *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 2008, doi:10.1017/CBO9780511811654.
- [15] Wooldridge, M.: *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley, 2009, ISBN 9780470519462.
- [16] Wooldridge, M.; Jennings, N. R.: Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, ročník 10, č. 2, 1995: str. 115–152, doi:10.1017/S0269888900008122.
- [17] Zbořil, F.: *Agentní a multiagentní systémy - Formální logiky pro agentní a multiagentní systémy*. 2018.

Prílohy

Príloha A

Obsah priloženého CD

Priložené CD obsahuje tieto súbory:

- Dokumentacia → Zdrojové texty k dokumentácii a preložená dokumentácia
- Poster → Návrh plagátu popisujúceho diplomovú prácu
- simulator → Simulátor používaný na simuláciu práce
- Jason-2.3 → Interpret jazyka Jason, vytvorení agenti implementovaný
- dogfight_agents_x64 → Zdrojové kódy agentov. Pričom konfigurácie multiagentných prostredí sú priamo v tejto zložke a vytvorené kódy agentov sú v podzložkách *src/asl* a *src/asl/libraries*.

Príloha B

Manuál

Spustenie práce

Nevyhnutelná prerekvizita pre spustenie projektu je vývojové prostredie Java JDK vo verzii 1.8. Návod je čiastočne prevzatý od pána Radka Burdy [4].

Ďalej sa projekt spúšťa následovne:

1. Pred spustením agentného systému je potrebné spustiť simulačný server, ktorý sa dá spustiť súborom `simulator/simulator.jar` alebo príkazom `java -jar simulator/simulator.jar` v zložke s odovzdanými súbormi.
2. Po spustení simulačného serveru je nutné spustiť vývojové prostredie interpreta jazyka *Jason*, ktoré je umiestnené v zložke `Jason-2.3/jedit/jedit.jar`.
3. Pre správne fungovanie vývojového prostredia je nutné nastaviť premennú Javu Home (menu *Plugins* → *Plugin Options* → *Jason* a na miesto, na ktorom je nainštalované prostredie Javy, napríklad: `C:\ProgramFiles\Java\jdk1.8.0_73`)
4. Ďalej, ak nie sú nastavené hodnoty *jason.jar location* a *Ant libs*, tak je potrebné ich nastaviť na hodnoty `Jason-2.3/libs/jason-2.3.jar` a `Jason-2.3/libs` v tomto poradí.
5. Otvoriť projekt projekt sa dá cez (menu *File* → *Open* → `dogfight_agents_x64\dogfight_agents_x64.mas2j`) alebo iný simulačnú konfiguráciu s príponou `.mas2j`
6. Spustiť danú konfiguráciu je možné cez (menu *Plugins* → *Jason* → *Run Project*) alebo spustením zelenej *Play* šípky v pravom spodnom rohu textového okna.

Po týchto krokoch sa agentné prostredie pripojí na simulátor a začne sa letecký súboj. Pred každým spustením agentného systému je nutné simulačný server reštartovať.

Konfigurácia agentného systému

V každej konfigurácii agentného systému sa nastavuje prostredie v premennej *environment*, ktoré môže vyzeráť napríklad takto

```
dogfight_agents.DogfightEnv("defensive_split.mas2j",1,2, 1200, 1). Pričom prvý argument udáva názov prostredia, druhý argument udáva počet modrých lietadiel v prostredí, tretí argument udáva počet červených lietadiel v prostredí, štvrtý argument udáva
```

počiatočnú vzdialenosť medzi lietadlami z rôznych tímov a posledný argument udáva smer letu jednotlivých lietadiel. Napríklad smer 0 značí, že lietadlá letia čelne proti sebe, smer 1 značí, že modrý tím napáda červený tím a smer 2 značí, že červený tím napáda modrý tím.

Ďalej sa dajú nastaviť implementácie jednotlivých agentov, a to *attacker* je agent, ktorý stále útočí, *cruiser* je agent, ktorý sa náhodne pohybuje po prostredí, títo agenti boli vytvorení pánom Radkom Budrom [4]. Ďalej je možné nastaviť implementáciu *sector_fighter*, ktorý používa na súboj taktiky letiek, *sector_fighter_defensive_split*, ktorý pri útoku nepriateľa zo zadu vždy použije taktiku defenzívneho rozdelenia.

Ovládanie simulácie

Po spustení simulácie je možné ovládať kameru klávesami **W,A,S,D,Q,Z**. Ďalej je možné pozastaviť simuláciu klávesou **medzerník** a potom krovať simuláciu klávesou **n**.