

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

**Analýza postavení palebných prvků a simulace náletu na
bojovou sestavu jednotky pozemní protivzdušné obrany**
Diplomová práce

Autor: Lukáš Láska
Studijní obor: Aplikovaná informatika (ai2)

Vedoucí práce: Ing. Richard Cimler
Odborný konzultant: Ing. Vlastimil Šlouf, Ph.D.

Hradec Králové

srpen 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Hradci Králové dne 18.8.2017

Lukáš Láska

Poděkování:

Zde bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Richardu Cimlerovi za odborné vedení, cenné rady a jeho trpělivost. Dále odbornému konzultantovi Ing. Vlastimilu Šloufovi, Ph.D. za všechny poskytnuté konzultace, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

Anotace

Cílem práce je navrhnout a implementovat model porovnávající úspěšnost různých postavení palebných prvků pozemní protivzdušné obrany, kde hlavními kritérii úspěšnosti jsou schopnost ubránit bráněný objekt a počet zničených letadel náletu. V práci je využito přístupu agentového modelování (ABM), které je zde popsáno. Dále jsou v práci uvedeny některé nástroje pro tvorbu ABM, a podrobněji pak zvolené prostředí pro implementaci AnyLogic. V praktické části je návrh modelu a popis jeho implementace. V závěru praktické části jsou pak uvedeny provedené experimenty na modelu.

Annotation

Title: The position analysis of fire elements and simulation of an airstrike on ground based anti-aircraft defense.

The main purpose of the Diploma Thesis is to design and implement the model which can compare success of different position setups of ground based anti-aircraft defense. The most significant indicator of success is ratio between non destroyed and total number of protected objects at the end of simulation run. Secondary indicator of success is ratio between destroyed aircrafts and number of total aircrafts. The Diploma Thesis also describes paradigm of agent based modeling and some frameworks for its modeling including AnyLogic, which was selected as implementing platform. Finally there is experimental part at the end of the Diploma Thesis.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Agentově orientované modelování	3
3.1	Historie a úvod	3
3.2	Model.....	3
3.3	Agent	4
3.4	Prostředí.....	5
3.5	Experiment	5
3.6	Využití ABM	6
3.6.1	Využití ABM ve vojenství.....	6
3.6.2	Simulace vlivu rušené komunikace	7
3.6.3	Agentová simulace efektivního rozmístění aktivních prvků protivzdušné obrany.....	8
3.7	Protokol ODD+D	8
4	Výběr simulační platformy	11
4.1	AnyLogic	12
4.2	Modely vojenství a obrany v AnyLogic	12
5	Numerické metody pro řešení nelineárních rovnic.....	14
5.1	Metoda půlení intervalů	14
5.2	Metoda regula falsi.....	15
5.3	Metoda sečen	16
5.4	Newtonova metoda.....	18
6	Model rozmístění palebných prvků a simulace náletu na bojovou sestavu jednotky pozemní protivzdušné obrany.....	20
6.1	Návrh modelu	20

6.2	Popis modelu podle protokolu ODD+D.....	21
6.3	Uživatelské rozhraní a nastavení parametrů modelu	32
6.4	Prostředí.....	35
6.4.1	Vizualizace a tvorba terénu	36
6.5	Agenti	37
6.5.1	Parametry a proměnné agentů.....	38
6.5.2	Počáteční rozmístění agentů	38
6.5.3	Pohyb agentů.....	38
6.5.4	Postřelování agentů.....	40
6.5.5	Algoritmy postřelování letounů.....	43
7	Experimenty provedené na modelu.....	44
7.1	Určení výchozího postavení palebného prvku.....	45
7.2	Vlivy jednotlivých parametrů	48
7.2.1	Vliv parametru dostřelu palebného prvku	49
7.2.2	Vliv parametru času mezi výstřely palebného prvku.....	50
7.2.3	Vliv parametru počtu střel palebného prvku	52
7.2.4	Vliv parametru výšky bodu výstřelu palebného prvku	52
7.2.5	Vliv parametru rychlosti střely palebného prvku.....	53
7.2.6	Vliv parametru pravděpodobnosti zásahu střely palebného prvku	54
7.2.7	Vliv parametru rychlosti letu letounu	55
7.2.8	Vliv parametru dostřelu letounu	56
7.2.9	Vliv parametru počtu střel letounu	57
7.2.10	Vliv parametru minimální výšky letu letounu nad terénem	58
7.2.11	Vliv parametru rychlosti letu střely letounu	58
7.2.12	Vliv parametru pravděpodobnosti zásahu střely letounu	59
8	Diskuse	60

9	Závěr.....	61
10	Seznam použité literatury	62
11	Seznam obrázků	65
12	Seznam tabulek.....	66
13	Seznam grafů.....	67
14	Přílohy.....	68

1 Úvod

Práce se věnuje analýze postavení pozemní protivzdušné obrany. Smyslem práce je vytvořit nástroj umožňující odborníkům analýzu různého postavení prostředků protivzdušné obrany (PVO). Pro účel vytvoření analýzy je využito paradigma agentového modelování, které je vhodné pro simulování chování a reakcí různých entit v prostředí.

V úvodu této práce je popsáno agentové modelování, jeho principy a využití. Dále jsou uvedeny některé nástroje pro jeho tvorbu, včetně jejich různých vlastností jako je podporovaná platforma nebo využívaný programovací jazyk. Následuje detailnější popis vybraného simulačního nástroje AnyLogic. Následně jsou uvedeny 3 ukázkové modely kategorie vojenství a obrany vytvořené společností AnyLogic. V závěru teoretické části jsou uvedeny numerické metody, které lze při vytváření modelu využít.

V praktické části je nejprve popsán návrh a implementace modelu zahrnující prostředí a v něm umístěné agenty. Dále je uveden popis modelu pomocí protokolu ODD+D, který je rozšířením původního protokolu ODD o rozhodování. Práce navazuje popsáním uživatelského rozhraní modelu, které je dostupné před spuštěním simulace. Následně je popsáno prostředí, jeho vlastnosti, vizualizace a tvorba. V další části jsou popsány různé typy agentů v navržené simulaci. Jedná se o detailní popis jejich proměnných, parametrů, a jiných prvků využitých při jejich tvorbě. V podkapitolách je pak popsáno rozmístění agentů a jejich pohyb. V závěru práce jsou uvedeny experimenty provedené na modelu, které sloužily k ověření jeho funkčnosti, dále pak experimenty které určují nejlepší postavení obranných palebných prvků pro zvolené nastavení modelu.

V textu jsou uvedeny některé odborné termíny, přeložené z angličtiny, kdy je uvedeno jejich originální znění v závorkách, pro lepší orientaci v dané problematice a porozumění textu.

2 Cíl práce

Cílem této práce je vytvořit multiagentní model pro podporu strategického rozhodování při obraně významných objektů. Pomocí simulací na tomto modelu bude možné analyzovat úspěšnost postavení obranných palebných prvků, kdy hodnotícími kritérii jsou schopnost ubránit bráněné objekty a počet sestřelených letounů. V modelu budou umístěny prostředky vzdušného napadení, protivzdušné palebné prvky a bráněné objekty. Vlastnosti a chování těchto prvků bude vytvořeno na základě konzultací s odborníky z oboru protivzdušné obrany. Pro otestování modelu budou provedeny experimenty, zkoumající základní funkčnosti modelu. Dále budou provedeny experimenty, které vyhodnotí úspěšnost konkrétních náletů.

3 Agentově orientované modelování

V následující kapitole je nejprve uveden úvod a historie agentově orientovaného modelování (*agent based modeling*, dále ABM). Následně jsou vysvětleny základní pojmy, jako jsou model, agent, prostředí a experiment. Závěr kapitoly popisuje využití ABM. Kromě uvedených zdrojů je v následující kapitole využito znalostí získaných během studia předmětů Znalostní technologie 3 a 4. [1][2]

3.1 Historie a úvod

Za první zdokumentované počátky agentově orientovaného modelování lze považovat buněčné automaty (*cellular automata*) Johna von Neumanna, vytvořené ve 40. letech 20. století. Širší uplatnění ABM započalo ovšem až počátkem 90. let.

Základem ABM je agent, který se řídí pravidly v daném prostředí. Agenti mohou mezi sebou nebo prostředím interagovat a lze tak pozorovat vývoj celého systému. Definování základních prvků (agentů) je označeno jako vytvoření mikro úrovně (*micro-level*), a chování celého modelu je makro úroveň (*macro-level*). Tento přístup je znám pod pojmem zdola-nahoru (*bottom-up*). [3]

3.2 Model

Modely a jejich využití sahá mnohem dál do historie než využívání počítačů. Model prezentuje nebo simuluje jevy skutečného světa. Hlavní výhodou modelu je, že stručně popisuje vztahy mezi prvky jeho předlohy. Zkoumáním modelu potom umožní snadnější pochopení reality. Existuje celá řada typů modelů, dále jsou uvedeny 3 příklady [4]:

- **Modely v měřítku** (*scale models*) jsou obvykle zmenšeniny své předlohy. Zmenšení obnáší často i snížení komplexnosti, například model letadla má stejný tvar, ale pravděpodobně neobsahuje elektronický řídicí systém, nebo funkční motory.
- **Ideální modely** (*ideal-type models*) využívají zjednodušujících pravidel či předpokladů, kde jsou zjednodušením odstraněny složité jevy. Zároveň model zůstává užitečný a lze z něho vyvozovat závěry o modelované

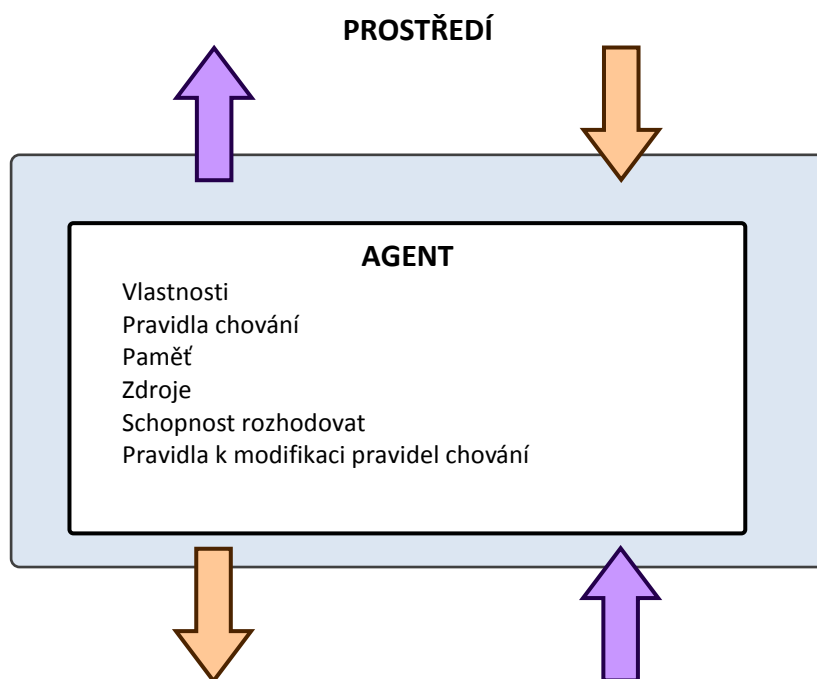
skutečnosti. Příkladem je idealizovaný model akciového trhu, kde se šíří informace mezi obchodníky v jeden okamžik.

- **Analogické modely** jsou založené na vytváření analogií mezi snáze pochopitelným jevem a jevem cílovým. Znáмым příkladem je *billiard ball* model atomů.

3.3 Agent

Pojem agent nemá pevně danou definici. Lze jej popsat jako komponentu, jenž se může nezávisle rozhodovat. Rozhodování může být určeno podle [5] jednoduchými pravidly reagujícími na podněty, ale dle [6] je potřeba, aby byl agent schopen přizpůsobit své chování na základě změn okolí a mít schopnost učení. Dle [7] by agenti měli mít jednak základní pravidla (*base-level rules*), a dále také pravidla vyšší úrovně (*higher-level rules*), které umožní měnit pravidla základní. Obecně lze shrnout vlastnosti agenta do následujících bodů viz obrázek 1:

- Agent je identifikovatelný, má charakteristické vlastnosti a soubor pravidel, jež řídí jeho chování. Lze určit co je součástí agenta a co nikoliv.
- Agent se nachází v prostředí, kde může interagovat s ostatními agenty
- Agent má stanovené cíle, kterých se snaží dosáhnout.
- Agent je nezávislý a může fungovat sám.
- Agent je flexibilní a může se učit na základě předchozí zkušenosti, k čemuž potřebuje nějakou formu paměti. [4][8][9]



Obrázek 1: Agent a jeho vlastnosti, upraveno podle [8, 9]

3.4 Prostředí

Prostředí je virtuálním místem, kde se agenti projevují. Nemusí mít na agenty žádný vliv, ale není to pravidlem. V závislosti na modelovaném jevu může být potřeba tyto vlivy modelovat. Velmi často prostředí představuje nějakou geografickou oblast například model rozložení obytných zón ve městě, kde prostředí zahrnuje charakteristické vlastnosti (hluk, smog), nebo modely mezinárodních vztahů, kde prostředí zachycuje státy a národnosti [10]. Kromě geografické oblasti může prostředí také tvořit například sítě, kde jsou agenti propojeni vazbami. [4]

3.5 Experiment

Experimentem v kontextu ABM se rozumí opakováním simulací za účelem pozorování chování modelu a zjišťování nových skutečností. Experimenty mohou být prováděny vícekrát s různými vstupními parametry, kdy lze pozorovat vliv těchto parametrů na chování modelu. Výsledky jsou ovšem relevantní jen tehdy, pokud je vliv prostředí a chování agentů dobře namodelováno. Využití experimentů a ABM je z praktického hlediska užitečné v šetření zdrojů, kdy může

jít například o zdroje finanční nebo i časové. Experimenty na modelu mohou umožňovat simulovat skutečnosti reálného světa, které nelze určit jinou metodou. [4]

3.6 Využití ABM

ABM je v současnosti stále více využíváné. Jedním důvodem tohoto trendu je potřeba analyzovat a modelovat stále složitější systémy, na které využití ostatních modelovacích nástrojů nestačí. Mezi další důvody patří například stále rostoucí výpočetní kapacita počítačů. ABM je využíváno od malých akademických projektů až po robustní systémy pro podporu rozhodování. Některé příklady využití ABM jsou uvedeny v tabulce 1. [8][9]

Využití v obchodu a organizacích	Biologie
výroba	ekologie
pojištění	skupinové chování zvířat
služby pro spotřebitele	chování buněk a molekul
dodavatelské řetězce	
Ekonomie	Terorismus
umělo-inteligentní finanční trhy	sociální ukazatele
obchodní sítě	organizační sítě
Infrastruktura	Vojenství
dodávka elektřiny	příkazy a kontrola
transport	
Řízení davu	Společnost a kultura
pohyb lidí	starověké civilizace
modelování evakuací	neposlušnost občanů

Tabulka 1: Příklady využití ABM, upraveno podle [8, 9]

3.6.1 Využití ABM ve vojenství

Jak je výše uvedeno ABM lze uplatnit ve velkém množství odvětví a vojenství není výjimkou. Vzhledem k povaze vojenství, kde existuje hierarchická struktura velení, je ABM vhodnou volbou. Lze zde uplatnit různou míru abstrakce, kdy jako samostatná entita může vystupovat i skupina vojáků (například četa).

ABM je využíváno i ministerstvem obrany Spojených států amerických, které využívají ABM k simulování procesů rozhodování a jeho zdokonalování. Vojenské konflikty ovlivňuje mnoho faktorů, a proto jsou jejich simulace velice komplexní,

mají mnoho vstupů, a jsou výpočetně náročné. Jako příklady vstupů lze uvést volby, které síly budou v simulovaném konfliktu působit, kdy a jak se zapojí, nebo jaké bude použito vybavení. Mnoho těchto vstupů není vždy předem známo, a proto je vhodné simulovat různé kombinace z široké škály hodnot vstupů.

V následujících kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 jsou uvedeny 2 konkrétní systémy využívající ABM. [11]

3.6.2 Simulace vlivu rušené komunikace

V originálním znění *Impact of Degraded Communications in the U.S. Army's Future Force* [11], je agentově orientovaná simulace, jejíž zaměření je zkoumání vlivů omezení komunikace mezi spojeneckými silami. Simulace byla vytvořena pomocí softwaru MANA (*Map Aware Non-uniform Automata*). Simulace vycházela ze scénáře fyzikálně založené simulace JANUS, která ovšem nebrala v potaz možnost omezení komunikace. V tomto scénáři probíhá útok v hornatém terénu na silně opevněného nepřítele v blízkosti letiště. Cíl útočníků je udržet letiště a zabezpečit jeho chod pro lepší podporu, přicházejících posil. Obránci mají informaci o tomto záměru, ale neznají přesnou polohu letiště ani časy příchodu posil. Obránci tedy vysílají své jednotky decentralizovaně, aby našli letiště a používaný letecký koridor. Simulace je ukončena když obránci utrpí kritické ztráty a nemají žádné jednotky schopné boje. K vyhodnocení výsledků simulace slouží 2 primární měřítka a to sice délka bitvy a ztráty nepřítele.

Komunikace mezi entitami je definována pomocí uzlů a vazeb mezi nimi, kde v každém uzlu byly parametricky zvoleny vlastnosti jako kapacita linky, maximální odezva, dosah komunikace nebo komunikační protokol. Každá entita má 2 možnosti komunikace, primární komunikaci, která může být rušena a sekundární komunikaci s horšími parametry, která ovšem nemůže být nikdy rušena. Z výsledků simulací vyplývají závěry, že kritickými parametry komunikace je její dosah. Pokud je dosah komunikace menší než 75% velikosti bitevního pole, jsou dramaticky negativně ovlivněny příchody posil. Druhým zjištěním je, že neodpovídající nebo pomalá komunikace prodlouží bitvu a tím zásadně zvýší ztráty útočníků.

3.6.3 Agentová simulace efektivního rozmístění aktivních prvků protivzdušné obrany

V roce 2016 vznikla Diplomová práce [12] zabývající se vyhodnocením rozmístění průzkumných prvků v prostředí. Práce se věnuje ABM a jeho využití pro danou problematiku. Součástí práce je také model vytvořený v prostředí AnyLogic.

Model obsahuje 3 typy agentů. Tito agenti reprezentují radiolokátor, vidového pozorovatele a letoun. Radiolokátor a vidový pozorovatel mají za úkol zachytit prolétávající letouny. Letoun je považován za zachycený, pokud je třikrát detekován. Schopnost detekovat je omezena okolním terénem, dále také vlastnostmi a stavem průzkumných prvků. Radiolokátor má definovaný maximální dosah detekce a úhly kde je možný radar podletět, případně nadletět a vyhnout se tak detekci. Dále závisí na stavu natočení radiolokátoru. Vidový pozorovatel má definovanou maximální vzdálenost dohledu a úhel, ve kterém vidí. Jedná se tedy o statickou výseč, kdy nedochází jako u radiolokátoru k žádnému otáčení. Letoun představuje v modelu obecný prvek vzdušného napadení. Jeho pohyb v prostředí je definován pomocí prvků *Path* a *Node*. Těmito prvky byly předdefinovány cesty v konkrétním prostředí.

V experimentech se zkoumají vlivy počtu průzkumných prvků na úspěšnost zachycení letounů a na vzdálenosti kde došlo k zachycení. Dále je experimentu využito na nalezení nejlepšího postavení 2 radiolokátorů a 2 vidových pozorovatelů. Všechny experimenty probíhají se stejnými zvolenými cestami letounů. Při experimentech bylo zjištěno, že 2 radiolokátory mají průměrně o 20% lepší úspěšnost než jeden, dále 3 radiolokátory jsou o 14% úspěšnější než dva. Přidáním čtvrtého radiolokátoru naroste úspěšnost pouze o 3%. U vidových pozorovatelů byly provedeny experimenty pouze pro počty 1 a 2. Jeden vidový pozorovatel měl úspěšnost 5% a dva vidoví pozorovatelé 11%.

3.7 Protokol ODD+D

Protokol ODD+D umožňuje standardizovaný způsob dokumentace modelu. Jedná se o tabulku, kde je formou otázka- odpověď popsán model. Protokol vznikl z důvodů potřeby popsání procesu rozhodování (*decision-making*). V [13] jsou uvedeny studie, které se zabývají myšlenkou, že začlenění procesu rozhodování do

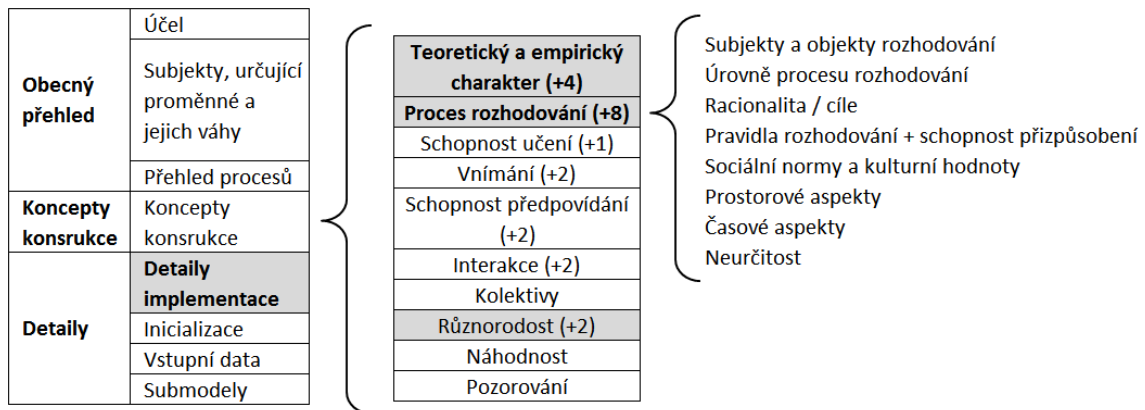
modelu má zásadní význam, kdy je pozorovaná makro úroveň modelu výrazně ovlivněna mikro úrovní právě tohoto rozhodování.

Dokumentace rozhodování je tedy zcela zásadní pro modelování.

Při dokumentaci ovšem dochází často ke dvěma zásadním nedostatkům. Prvním z nich je nedostačující popis rozhodování, kdy nejsou uvedeny jeho teoretické nebo empirické základy. Druhý nedostatek spočívá ve špatném, neúplném nebo nejasném popisu modelu, který neumožňuje reprodukci modelu a jeho výsledků.

Při řešení prvního nedostatku rozhodování lze v ABM uplatnit více teoretických konceptů. Jedním z nich je teorie racionálního jednání (*rational-choice theory*), předpokládající racionální chování agenta maximalizujícího zisk. Další přístupy jsou založené na omezené racionalitě agentů, například pravidla podmíněných akcí (*condition-action rules*), případně lze využít kombinaci obou zmíněných přístupů. V případě druhého problému byly vyvíjeny klasifikační schémata a protokoly popisující agentově založené modely.

Vzniklý protokol ODD (*Overview, Design Concepts and Details*) zaměřený na ABM byl přijat vědeckou komunitou. ODD je rozdělen do 3 částí. První z nich popisuje obecný přehled účelu a hlavních procesů modelu. Druhá část popisuje koncepty konstrukce modelu a poslední část uvádí detailní informace o implementaci modelu. Protokol ODD ovšem plně neumožňoval popis rozhodování. V návaznosti proto vznik protokol ODD+D (*ODD + Decision*), který rozšiřuje protokol ODD právě o popis rozhodování. V souvislosti s tím byla mírně změněna struktura protokolu. Část základní principy (*Basic Principles*) byla přejmenována na teoretický a empirický charakter (*Theoretical and empirical background*). Další změny v protokolu jsou znázorněné na obrázku 2, kde šedé sekce představují nové kategorie, čísla uvedená v závorkách označují počet přidávaných otázek v dané kategorii a konečně v pravé části jsou uvedené aspekty nového konceptu procesu rozhodování (*Individual decision making*). [13]



Obrázek 2: Znázornění změn mezi protokoly ODD a ODD+D, upraveno podle [13]

4 Výběr simulační platformy

Existuje celá řada různého softwaru zaměřeného na tvorbu ABM a provádění simulací. Liší se například používaným programovacím jazykem, licencí pro používání, vyžadovaným operačním systémem nebo svojí specializací, komplexností a poskytovanou podporou. Vybraná kritéria jsou popsána níže. [14] Podle [14] je nejčastějším programovacím jazykem pro tvorbu ABM Java (např. [15][16][17]). Následují jazyky C++, C (např. [18][19][20]) a jazyky odvozené z jazyka Logo (např. [21][22]). Některé platformy dokonce podporují více jazyků zároveň. Pro tvorbu ABM existují i programy podporující vizuální programování (*visual programming*) například StarLogo TNG [22].

Důležitým faktorem při výběru vhodného modelovacího nástroje je i licence pro jeho použití. Některé programy jsou volně použitelné, další jsou volně použitelné pouze pro vzdělávací účely a jsou zde i programy komerční. Dle [14] je většina nástrojů zdarma.

Majorita ABM nástrojů funguje na operačních systémech Windows a Linux, ačkoliv existuje i celá řada softwaru pro operační systémy Macintosh. Častým trendem je využití jazyku Java, který umožňuje funkčnost nástroje nezávisle na platformě. [14] Software umožňující tvorbu ABM může být zaměřený na konkrétní doménu jako je například umělá inteligence, biologie, vzdělání, zábava, sociální výzkum, nebo může být navrhnut jako víceúčelový nástroj. V tabulce 2 jsou uvedeny některé vybrané nástroje společně s jejich specializací. [14]

Doména	Nástroj
Více účelové (obecné)	AnyLogic Ascape Swarm
Umělá inteligence	Breve iGen
Biologie	SimBioSys
Buněčné automaty	JCA-Sim
Ekonomie/aukční mechanismy	ECHO
Řízení přírodních zdrojů	Cormas
Politické jevy	PS-I
Městské simulace	OBEUS

Tabulka 2: Ukázka vybraných ABM nástrojů a jejich domén, upraveno podle [14]

4.1 AnyLogic

AnyLogic je simulační nástroj vyvíjen stejnojmennou společností podporující nejen ABM, ale umožňuje také modelování systémové dynamiky nebo diskrétních událostí, případně lze tyto principy kombinovat. Prostředí využívá programovacího jazyku Java. Poslední verze programu 7.3 je dostupná ve 3 licenčních variantách Professional, Univerzity Researcher a Personal Learning Edition (PLE). Varianta PLE je zcela zdarma pro vzdělávací účely. AnyLogic poskytuje instalátory pro operační systémy Windows, Linux a Mac OS.

AnyLogic poskytuje rozsáhlou podporu v podobě ukázkových modelů, výukových videí, online nápovědou. Dále je nabízena možnost účastnit se pořádaných placených konferencí a tréninkových kurzů, které jsou i více denní. [15]

AnyLogic byl vybrán jako platforma pro implementaci modelu, z důvodů velkého množství nástrojů, rozsáhlé dokumentace a rozšířenosti jazyka Java.

4.2 Modely vojenství a obrany v AnyLogic

Společnost AnyLogic vytvořila 3 ukázkové modely kategorie vojenství a obrany:

- teroristický útok na náměstí,
- model sériových vrahů,
- model proti letecké obrany.

První z uvedených modelů neumožňuje měnit žádné parametry simulace. Simuluje pouze jednu situaci, kdy nákladní automobil vjede do středu zalidněného náměstí a odpálí nálož. Po odpálení výbušniny, přeživší lidé utíkají od exploze směrem k nejbližším východům. Model demonstruje kombinaci užití ABM a modelování diskrétních událostí. K pohybu lidí jsou využity nástroje z Pedestrian Library. Model nemá žádnou ukončující podmínku a stále běží, i když v modelu nejsou žádní aktivní agenti.

V modelu sériových vrahů jsou 2 typy agentů, vrahové a oběti. Lze zde měnit 2 parametry. Prvním z nich je poloměr, ve kterém vrah hledá oběť. Pokud jsou v tomto poloměru některé oběti, vrah si náhodně jednu vybere a pronásleduje ji. Druhý parametr určuje minimální vzdálenost, při které je schopen oběť zabít.

Pokud při dosažení této vzdálenosti není v okruhu prvního parametru žádná další oběť (svědek), vrah svoji oběť zabije. Při usmrcení všech obětí model není ukončen a vrahové se dále pohybují v prostředí.

V modelu protiletectké obrany je celkem 5 agentů. Jsou to letadla, radary, bomby, střely a bráněné objekty (*assets*). Letadla se snaží zničit bráněné objekty shozením bomby na ně. Radary chrání bráněné objekty sestřelováním letadel pomocí raket. V modelu je 6 nastavitelných parametrů, které ovlivňují vlastnosti letadel, raket a radarů. Pokud jsou nějaké nezničené bráněné objekty, jsou v intervalech generována nová letadla. Zničený bráněný objekt je po určitém čase opraven. Simulace nemá žádnou ukončující podmínku (při zničení všech bráněných objektů, nejsou generována letadla, začnou se opět vytvářet až po obnovení některého z bráněných objektů). [23]

Výše uvedený model protiletectké obrany zahrnuje stejné typy prvků, které budou využity při tvorbě vlastního modelu. Z praktického hlediska ovšem ukázkový model od AnyLogic neřeší problematiku rozmístění palebných prvků, ale pouze demonstruje vlivy změn některých jejich vlastností. Střelbu zde neovlivňuje terén, jde pouze o vizuální aspekt. Dále ukázkový model obsahuje zjednodušenou mechaniku postřelování, kdy jsou letouny postřelovány, až když se nacházejí v oblasti dostřelu palebných prvků. Reálně lze začít postřelovat letoun dříve, tak že za čas, který vypuštěná raketa uletí na okraj oblasti dostřelu, i letoun doletí do této oblasti, a letoun může být sestřelen na hranici této oblasti. Pro simulaci toho principu je využito numerických metod popsanych v následující kapitole 5, které jsou použity pro určení správného okamžiku střelby.

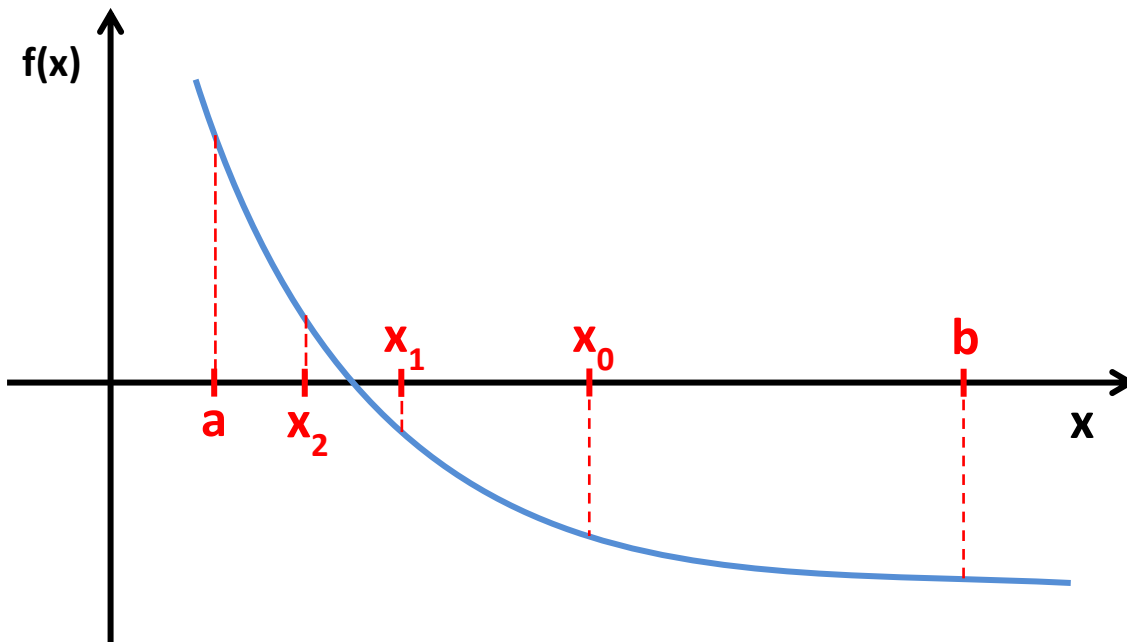
5 Numerické metody pro řešení nelineárních rovnic

Řešení nelineárních rovnic je potřeba pro numerický výpočet určení okamžiku střelby, kdy obranný palebný prvek může postřelovat letoun tak, že vystřelí v momentě, kdy letoun není v prostoru dostřelu obranného prvku. Za čas, který vystřelená raketa uletí k hranici dostřelu, se do prostoru dostřelu letoun dostane a nastane možný střet rakety s letounem. Situace, kdy je metoda využita, je popsána včetně některých detailů implementace v kapitole 6.5.4. Řešením nelineární rovnice se rozumí, najít body ležící v množině reálných čísel, pro která platí, že jejich funkční hodnota je rovna 0. V následujících podkapitolách jsou uvedeny 4 metody, které lze využít. Pro následující podkapitoly jsou využity zdroje [24][25][26].

5.1 Metoda půlení intervalů

Metoda známá též jako metoda bisekce, je iterační metoda, která vždy konverguje ke kořenu. Tato metoda je obecně velice pomalá, čímž je myšleno, že se ukončí po více iteracích než u ostatních metod. Metoda předpokládá, že je funkce spojitá na zvoleném intervalu $[a, b]$ a že platí vztah $f(a) * f(b) < 0$. Princip metody spočívá v určení funkční hodnoty v polovině tohoto intervalu. Pokud je funkční hodnota rovna 0, je nalezen kořen rovnice a metoda je ukončena. Pokud je funkční hodnota různá od 0, je potřeba určit nový interval, na kterém se bude hledat další funkční hodnota v jeho polovině. Rozpůlením předchozího intervalu vznikají 2 potenciační nové intervaly pro další iteraci. Pro pokračování je vybrán interval, pro který opět platí vztah $f(a) * f(b) < 0$, čímž je zajištěno, že v tomto intervalu leží hledaný kořen. Metoda může být ukončena i omezením počtem iterací, nebo předem zvolenou požadovanou přesností, kdy se ukončí, pokud je polovina rozdílu krajních bodů intervalu menší nebo rovna zvolené přesnosti. Pokud je na intervalu více kořenů, je nalezen pouze jeden kořen. Maximální možná nepřesnost spočteného kořene je polovina velikosti posledního intervalu (nepřesnosti vznikají možným zaokrouhlováním desetinných míst). Pro ilustraci jsou první 3 kroky iterace metody půlení intervalu zobrazeny na obrázku 3. Zde je modře zobrazena

funkce, na které je hledán kořen. Červeně jsou značeny body a , b představující zvolený interval a body x_0 , x_1 , x_2 představují postupně body možných kořenů.



Obrázek 3: Princip iterační metody půlení intervalu, upraveno podle [27]

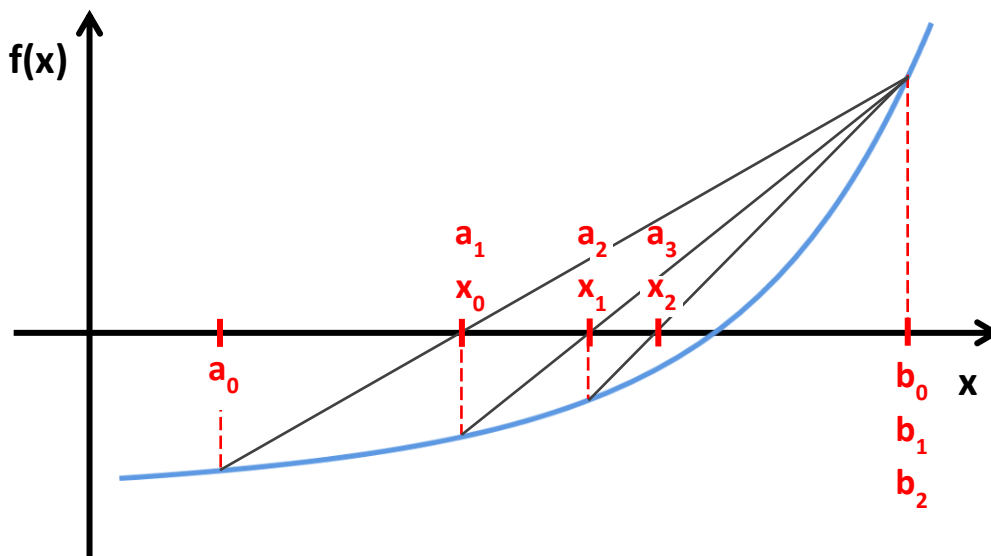
5.2 Metoda regula falsi

Jedná se o iterační metodu, která je vždy konvergentní. Metoda může v některých případech konvergovat rychleji než metoda půlení intervalu, ale obecně to platné není. Podobně jako u metody půlení intervalu je spočtena funkční hodnota v určitém bodě. U této metody je však dělicím bodem intervalu průsečík osy x se sečnou procházející body $[a, f(a)]$ a $[b, f(b)]$. Tento průsečík lze obecně vypočítat rovnicí:

$$x_k = b_k - \frac{b_k - a_k}{f(b_k) - f(a_k)} f(b_k)$$

kde dolní indexy k značí číslo iterace, a , b jsou krajní body intervalu a $f(a)$, $f(b)$ jsou jejich funkční hodnoty. Pokud spočtená hodnota není hledaný kořen, je určen další interval rozdělením intervalu tímto bodem, kdy opět musí platit podmínky, že pro krajní body intervalu $[a, b]$ platí $f(a) * f(b) < 0$. Podobně jako u metody půlení intervalu lze výpočet omezit počtem iterací, nebo zvolenou přesností značenou ε , které je větší než 0. Jestliže platí $|x_k - x_{k-1}| < \varepsilon$ je potřeba dále určit platnost nerovností $f(x_k) f(x_k + \varepsilon) < 0$ nebo $f(x_k) f(x_k - \varepsilon) < 0$. Pokud jedna

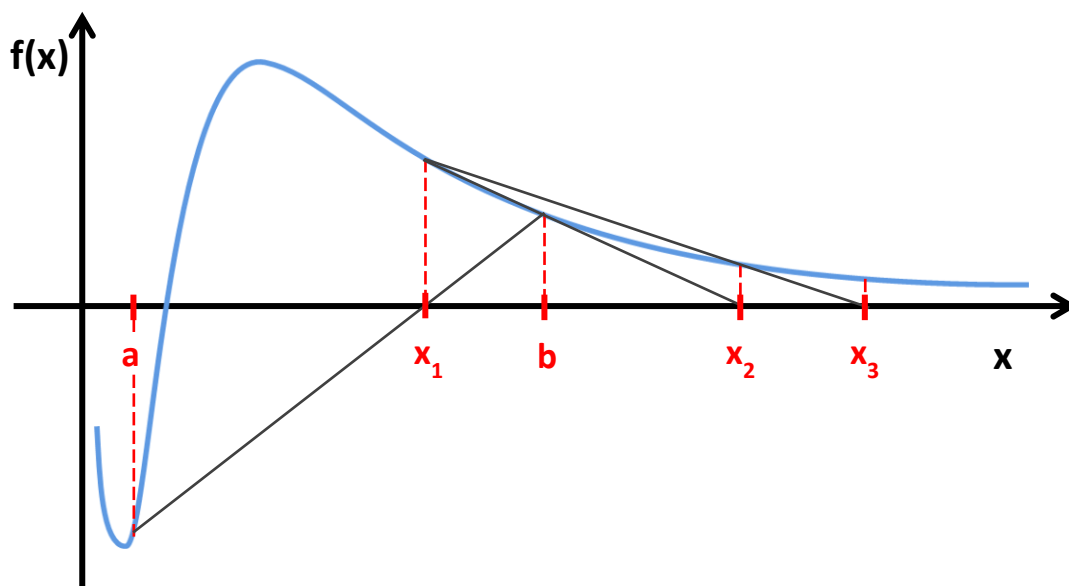
z nerovností platí, znamená to, že kořen leží v intervalu $[x_k, x_k + \varepsilon]$ případně $[x_k, x_k - \varepsilon]$ z čehož vyplývá, že maximální odchylka je právě ε . Metoda je zobrazena na obrázku 4, kde jsou znázorněny první 3 kroky iterace, slabé černé přímky představují sečny krajních bodů jednotlivých intervalů.



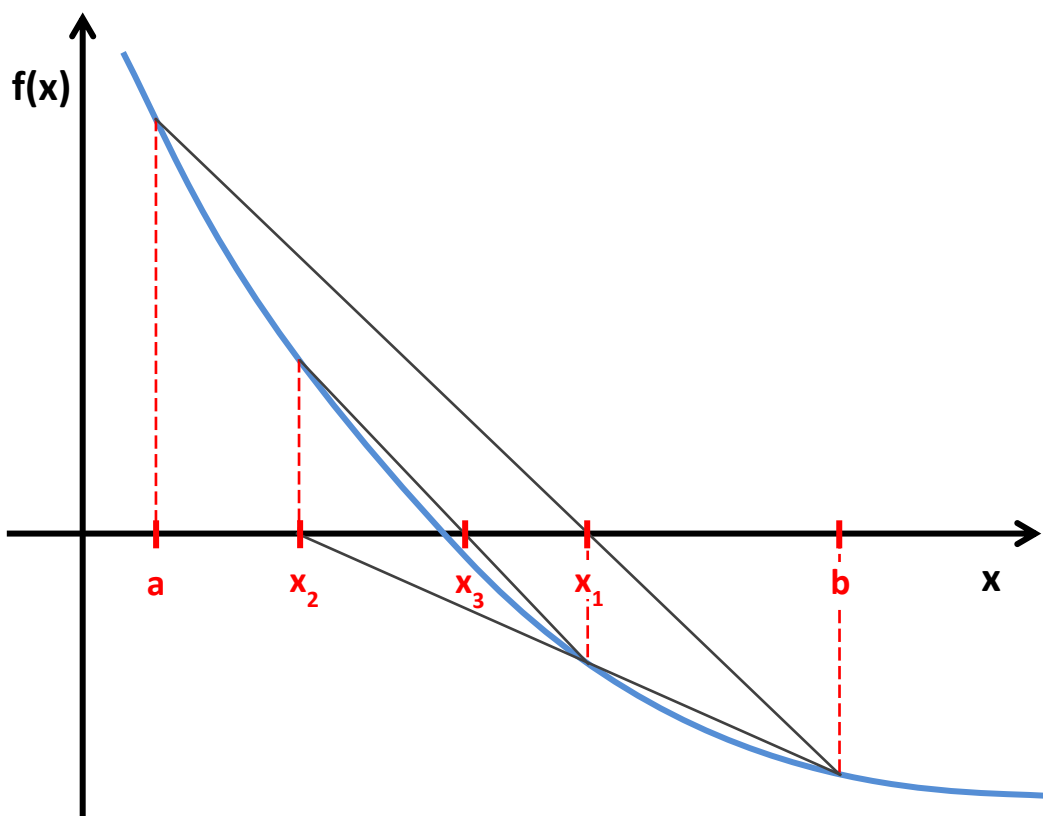
Obrázek 4: Princip iterační metody regula falsi, upraveno podle [25]

5.3 Metoda sečen

Metoda sečen je iterační metoda rychlejší, než metoda regula falsi. Metoda ovšem nemusí vždy konvergovat, viz obrázek 5. Iniciační metoda začíná opět na zvoleném intervalu $[a, b]$ obsahující kořen, kde je stejně jako u metody regula falsi určen bod x_1 průtiskem sečny a osy x . Dále však není vybírán interval obsahující kořen, ale je vedena další tečna tentokrát body $[b, f(b)]$ a $[x_1, f(x_1)]$. Průnikem této tečny s osou x vzniká další bod x_2 . Takto se pomocí tečen určují další body x_k dokud není nalezen kořen rovnice, nebo pokud platí $|x_k - x_{k-1}| < \varepsilon$. Tato podmínka stejně jako u metody regula falsi nezaručuje maximální odchylku ε od kořene x_k . Metodu je vhodné omezit maximálním počtem iterací, pro případ že by nekonvergovala. Princip metody je znázorněn na obrázku 6.



Obrázek 5: Nekonvergující průběh iterační metody sečen, upraveno podle [25]



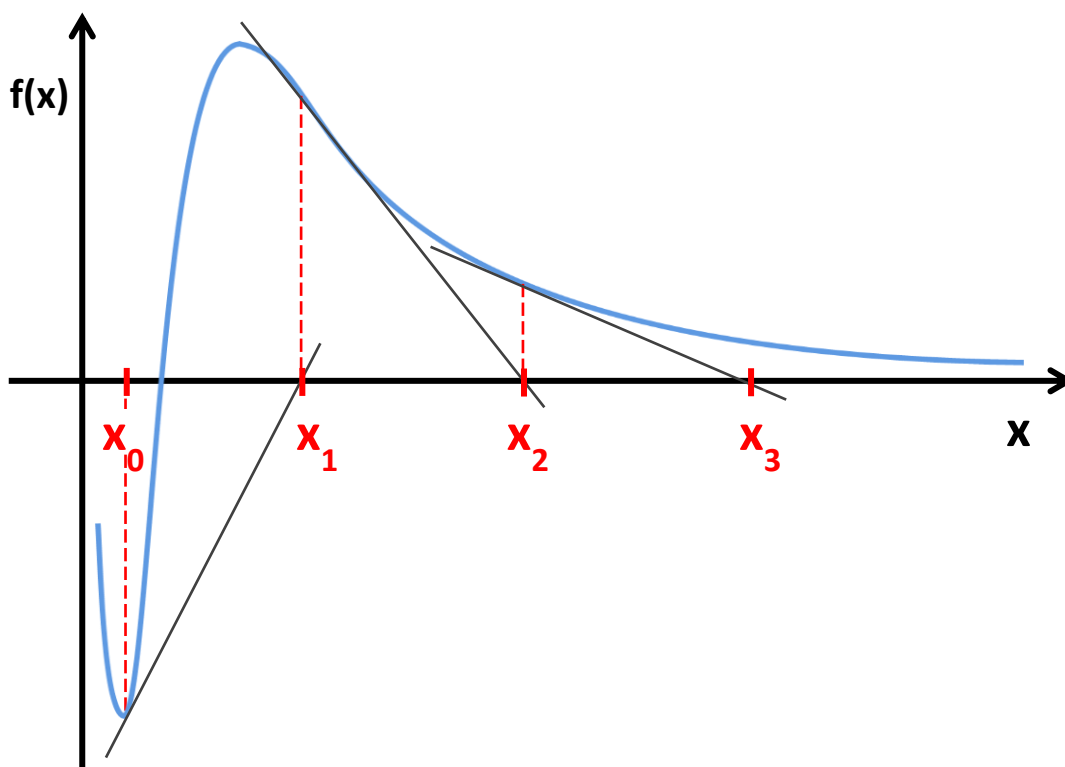
Obrázek 6: Princip iterační metody sečen, upraveno podle [25]

5.4 Newtonova metoda

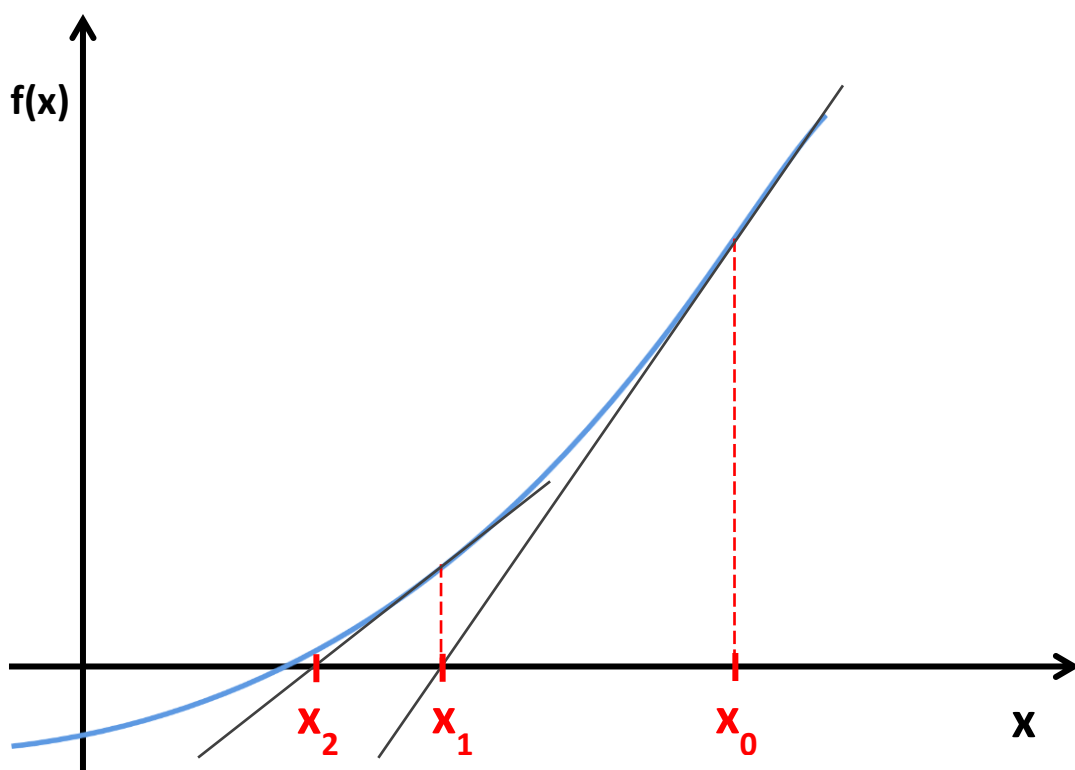
Newtonova metoda, někdy také označována jako metoda tečen, je iterační metoda, která předpokládá, že je funkce na zvoleném intervalu $[a, b]$ derivovatelná. Aby byla zaručena konvergence metody, musí pak dále platit Fourierovy podmínky:

- leží-li v intervalu $[a, b]$ jediný kořen rovnice, platí vztah $f(a)f(b) < 0$,
- první a druhá derivace nemění na intervalu $[a, b]$ znaménko (funkce zde pouze roste, nebo pouze klesá a funkce je zde pouze konvexní nebo konkávní) a pro všechna x v tomto intervalu platí $f'(x) \neq 0$.

V prvním kroku metody se zvolí bod x_0 ležící v intervalu $[a, b]$, pro který platí vztah $f(x_0) f''(x_0) > 0$. Další bod iterace je získán průsečíkem osy x a tečny ke grafu funkce vedené bodem $[x_0, f(x_0)]$. Tento a každý další bod v iteraci lze spočítat vztahem $x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$. V případě že nejsou splněny Fourierovy podmínky, funkce konvergovat nemusí, proto je vhodné omezit počet iterací této metody. Obrázek 7 ilustruje situaci, kdy metoda nekonverguje a obrázek 8 znázorňuje konvergující průběh.



Obrázek 7: Nekonvergující průběh Newtonovy metody, upraveno podle [25]



Obrázek 8: Princip Newtonovy metody, upraveno podle [25]

6 Model rozmístění palebných prvků a simulace náletu na bojovou sestavu jednotky pozemní protivzdušné obrany

V předcházejících kapitolách jsou popsány teoretické aspekty modelování, simulace a nástrojů na jejich tvorbu včetně ukázek některých již existujících modelů. Následující kapitoly se zabývají praktickou částí návrhu a vytvoření vlastního modelu. Je zde popsán kompletně celý model - tedy typy agentů, algoritmy jejich chování a prostředí, ve kterém jsou umístěni. Model je popsán pomocí protokolu ODD+D, který je popsán v kapitole 3.7. Model vznikl, za účelem analýzy různých postavení pozemních palebných prvků, kdy lze testovat různé kombinace postavení stejných i různých prvků. Dále lze experimentovat pouze s různými vlastnostmi prvků, takže lze například určit, jestli je vhodné někde umístit prvek s lepšími vlastnostmi, nebo jestli je to mrhání zdroji (pokud nasazení lepšího prvku nepřinese větší úspěšnost obrany). Vzniklý model bude sloužit jako podpůrný nástroj při rozhodování expertů v oblasti PVO.

6.1 Návrh modelu

Návrh logiky modelu vznikl na základě informací získaných z odborných konzultací s Ing. Vlastimilem Šloufem, Ph.D. odborníkem působícího ve firmě Retia jako vedoucí útvaru technické podpory systému pozemní protivzdušné obrany. Účel modelu je analyzovat možnost efektivního postavení palebných prvků v daném geografickém prostředí. Model bude svojí podstatou řešit plánovací úlohu, kdy se nepředpokládá jeho využití v reálném čase, při rozhodování o vhodném umístění prvků protivzdušné obrany. Účel modelu je dopředu analyzovat různé scénáře náletů ze zvolených náletových směrů. Model umožní zkoumat vliv rozmístění a počtu obranných palebných prvků na výsledek náletu, což reálně pomůže k lepšímu rozdělení zdrojů. Například v situaci, kdy dojde ke zjištění, že 3 palebné prvky měly o 10% horší výsledek než 4 palebné prvky pro danou simulaci, by mohl být 1 palebný prvek využit jinde, kde by přinesl vyšší užitek. V krizové situaci by tak díky nasbíraným poznatkům z modelu mělo dojít k rychlejšímu a lepšímu rozhodování.

Model simuluje přímý nálet letounů na bráněný objekt ve zvoleném geografickém prostředí, které může být vytvořeno z GIS dat. Prostředí je vytvořeno z výškových dat, kde výchozí terén obsahuje nerovnosti, ovlivňující ostatní agenty. Prostředí má zásadní dopad na schopnost prvků postřelování nepřátel (např. pokud je mezi letounem a bráněným objektem vyvýšenina, letoun není schopný vystřelit na bráněný objekt). V prostředí lze libovolně umístit palebné prvky, letouny i bráněné objekty. Palebné prvky jsou během simulace nemobilní a mají úplnou informaci o pozici všech letounů. V této práci se neřeší samotná lokalizace letounů. Touto problematikou se zabývala diplomová práce [12], ve které se řeší způsoby detekce jednotek vzdušného prostoru vidovými pozorovateli a radary. Předpokládá se vznik další práce, která se bude zabývat sloučením průzkumných a palebných prvků a dojde ke vzniku komplexnějšího modelu, za využití poznatků stávajících modelů. Letouny, palebné prvky a jejich střely mají nastavitelné parametry. U letounů je to rychlost letu, dostřel, rychlost střelby, počet střel a minimální výška letu nad terénem. Palebné prvky mají jako parametry nastavitelné vlastnosti dostřelu, rychlost palby, počet střel a výšku palebného bodu nad povrchem. Samotné střely těchto 2 typů agentů mají volitelnou rychlost pohybu a šanci zasáhnout cíl. Reálně by dostřel všech prvků byl ovlivněn typem použité střely, ale v rámci abstrakce je dostřel definován pouze zvolenou hodnotou vzdálenosti.

6.2 Popis modelu podle protokolu ODD+D

Jak je uvedeno v kapitole 3.7, protokol ODD+D složí k popsání důležitých aspektů modelu. Tento popis je realizován v tabulce 3, kde je formou otázka-odpověď popsán vzniklý model náletu na sestavu jednotky protivzdušné obrany.

I. Obecný přehled	I.i. Účel	I.i.a Jaký je účel výzkumu?	Analyzovat a vyhodnotit postavení pozemních obranných palebných prvků při náletu na bráněné objekty.
		I.i.b Pro koho je model navržen?	Model je navržen pro vojenské specialisty v oblasti obrany vzdušného prostoru.
	I.ii Subjekty, určující proměnné a jejich váhy	I.ii.a Jaké typy entit se vyskytují v modelu?	Čtyři typy agentů: Aircraft (letoun), Defense (obrný palebný prvek), Missile (střela), ProtectedObject (bráněný objekt).
		I.ii.b Jaké atributy charakterizují tyto entity?	Pro všechny typy agentů je to poloha v prostoru. Pro letoun pak dále cíl letu, stav (zničený/nezničený) a kategorie, která určuje rychlost, dostřel, rychlost střelby, počet střel a typ střel. Pro obrný palebný prvek dále stav (připraven ke střelbě/nepřipraven), zaměřený cíl a kategorie, která určuje dostřel, rychlost střelby, počet střel, typ střel, výšku bodu výstřelu a algoritmus použitý pro výběr cíle. Pro střelu dále zdroj výstřelu, cíl letu a kategorie, která určuje rychlost letu a pravděpodobnost zásahu. Pro bráněný objekt dále stav (zničen/nezničen). Detailněji popsáno v kapitole 6.5.1, kde jsou uvedeny i pomocné proměnné a jiné využití prvky.
		I.ii.c Jaké jsou vnější faktory modelu?	Parametry prostředí závisí na nastavení vstupů uživatelem.

	I.ii.d Jak je v modelu rozvržen prostor?	Prostor je definován dvojrozměrnou výškovou mapou. Zobrazení je realizováno pomocí uzlu ElevationGrid souboru typu x3d určeného pro zobrazování scén.
	I.ii.e Jaké je časové a prostorové rozlišení modelu?	<p>Základní jednotkou času modelu je sekunda, jeden výpočetní krok simulace představuje 0,01 sekundy. Model simuluje situaci trvající v rozmezí zhruba 1,5 minuty až 20 minut podle zvolených parametrů.</p> <p>Základní jednotkou délky modelu je metr. Výchozí prostředí prezentuje čtvercovou oblast o velikosti strany 50km. Na této délce je rozlišeno 250 výškových bodů, celkem je zde tedy 62500 výškových bodů. Výšková mapa je zobrazena pomocí x3d souboru a spojuje výškové body pomocí interpolace jejich hodnot. Model je navržen, aby umožnil načíst čtvercové oblasti o délce strany 10km až 100km s různým počtem výškových bodů ve formátu x3d obsahujícím právě jeden uzel ElevationGrid.</p>

	I.iii Přehled procesů	I.iii.a Co která entita dělá a v jakém pořadí?	<p>Letoun letí směrem k bráněnému objektu. V případě, že je bráněný objekt na dostřel a v cestě nepřekáží terén, vystřelí letoun raketu.</p> <p>Obranný palebný prvek postřeluje letouny za podmínek že: nenabíjí, má munici, v trajektorii střeli se nenachází terén a je vypočítán dolet postřelovaného letounu v oblasti doletu střely.</p> <p>Střela letí od místa vypuštění směrem ke svému cíli. Při inicializaci je vypočtena její délka života na základě její rychlosti a dostřelu agenta, který ji vytvořil. Při dosažení cíle nebo uplynutí délky života je střela zničena.</p> <p>Bráněný objekt se aktivně nezapojuje do simulace. Může být pouze zničen zasažením rakety.</p>
II. Koncepty konstrukce	II.i Teoretický a empirický charakter	II.i.a Jaké základní koncepty, teorie nebo hypotézy leží za návrhem modelu na systémové úrovni nebo na úrovni submodelů?	<p>V modelu je využita detekce kolizí, v případě střelby je pomocí principu line-of-sight zjišťováno, jestli se na trajektorii střely nenachází terén. Dále určování zdali se postřelovaný cíl nachází v oblasti dostřelu, kde je využito určení vzdálenosti 2 bodů v prostoru.</p> <p>Výpočet predikce polohy, konkrétně je využito iterační metody sečen, pro určení okamžiku výstřelu na pohybující se letoun viz kapitola 6.5.4.</p> <p>Zničení prvků je určeno na základě zvolené pravděpodobnosti zásahu.</p>

	<p>II.i.b Na jakých předpokladech je založen model rozhodování agentů?</p>	<p>Letouny vybírají jako cíle nejbližší bráněné objekty. Pokud letounu dojde munice, letí na nejbližší okraj mapy. Letouny mění trajektorii, pokud byl jejich cíl zničen, nebo pokud jsou bez munice. Obranné palebné prvky vybírají cíle podle zvoleného algoritmu, viz kapitola 6.5.5.</p>
	<p>II.i.c Proč jsou vybrány dané rozhodovací modely?</p>	<p>Vybrané rozhodovací modely jsou vybrány, aby simulovali problematiku přímého náletu a postřelování cílů co nejvěrněji a zároveň byly výpočetně realizovatelné.</p>
	<p>II.i.d Je-li model / submodel založen na empirických datech, odkud tato data pocházejí?</p>	<p>Prostředí využívá výšková data získaná z [28], které slouží jako prostředník a získává data z OpenStreetMap. Rozsahy hodnot vlastností a parametrů agentů byly získány na konzultacích s Ing. Vlastimilem Šloufem Ph.D.</p>
	<p>II.i.e Na jakém stupni agregace byla data dostupná?</p>	<p>Výšková data rozlišují 256 výškových úrovní, pro čtvercovou oblast o velikosti strany 50km. Vzdálenosti výškových bodů je 46,25 metru.</p>
	<p>II.ii Proces rozhodování</p>	
	<p>II.ii.a Jaké jsou subjekty a objekty procesu rozhodování? Na jaké úrovni agregace je proces rozhodování modelován? Je zahrnuto více úrovní procesu rozhodování?</p>	<p>Agregace je na úrovni jednotlivců. Každá entita se řídí pravidly na základě vlastního stavu.</p>

<p>II.ii.b Jaká je základní racionalita v procesu rozhodování modelu? Mají agenti jednoznačný úkol?</p>	<p>Letoun letí vždy směrem k nejbližšímu bráněnému objektu. Obranný palebný prvek postřeluje vždy cíl s nejvyšší prioritou v závislosti na zvoleném algoritmu vyhodnocení priority. Oba typy agentů mají vždy jednoznačně určený cíl.</p>
<p>II.ii.c Jak se agenti rozhodují?</p>	<p>Letouny vybírají jako cíl nejbližší bráněný objekt (pouze první cíl, lze volit uživatelsky libovolně). Obranné prvky postřelují letouny podle zvoleného algoritmu určující priority, viz kapitola 6.5.5.</p>
<p>II.ii.d Přizpůsobují agenti své chování měnícím se vnitřním a vnějším proměnným?</p>	<p>Při zásahu letounu (změna proměnné isDestroyed) změní barvu a přestane vykonávat pohyb. Letoun není z modelu odebrán, pro lepší vizuální analýzu, kde došlo k sestřelení letounu.</p>
<p>II.ii.e Mají v procesu rozhodování roli sociální normy a kulturní hodnoty?</p>	<p>Nemají, koncept sociálních norem a kulturních hodnot není v modelu zahrnut.</p>
<p>II.ii.f Mají v procesu rozhodování roli prostorové aspekty?</p>	<p>Ano, možnosti postřelování jsou závislé na poloze agentů. Schopnost postřelování je ovlivněná vzdáleností (dostřel agenta) a terénem.</p>
<p>II.ii.g Mají v procesu rozhodování roli časové aspekty?</p>	<p>Ano, palebný prvek při výběru cíle podle zvoleného algoritmu bere primárně nebo sekundárně v potaz dobu letu letounu k bráněnému objektu. Dále se určuje na základě doby letu rakety moment postřelování letounu.</p>

	II.ii.h Do jakého rozsahu a jak je v rozhodování agentů zahrnuta neurčitost?	Neurčitost není zahrnuta, předpokládá se úplná informovanost agentů.
II.iii Schopnost učení	II.iii.a Je v procesu rozhodování zahrnuto individuální učení?	Individuální učení v modelu není využito.
	II.iii.b Je v modelu implementováno kolektivní učení?	Kolektivní učení není v modelu využito.
II.iv Vnímání	II.iv.a Jaké vnitřní a vnější proměnné jednotlivci vnímají pro rozhodování? Je proces vnímání nepřesný?	Letouny vnímají stav bráněného objektu (zničen/nezničen). Obranné palebné prvky vnímají rychlost, pozici letounů a stav letounů. Oba výše uvedené typy agentů vnímají terén a jeho výšku. Proces vnímání je přesný.
	II.iv.b Jaké proměnné ostatních jednotlivců mohou jednotlivci vnímat?	Viz II.iv.b.
	II.iv.c Jaký je prostorový rozsah vnímání?	Každý agent má úplnou informaci o celém prostředí. Ovlivněn je pouze prostředím v jeho okolí (letoun je omezován terénem ve své trajektorii, kdy mění vertikální naklonění, palebný prvek je omezen zvoleným dostřelem a také terénem, který může bránit v postřelování letounu).
	II.iv.d Jsou mechanismy, kterými agenti získávají informace jednoznačně modelovány, nebo	Mechanismy získávání informací nejsou v modelu zahrnuty. Agenti znají potřebné proměnné.

	jednotlivci prostě znají tyto proměnné?	
	II.iv.e Jsou v modelu zahrnuty náklady pro poznávání a pro shromažďování informací?	V modelu není zahrnut tento koncept.
II.v Schopnost předpovídání	II.v.a Jaké data agenti používají k předpovídání budoucích podmínek?	Obranné palebné prvky využívají údaje o rychlosti a pozici letounů, dále využívají informace o rychlosti střel, které vypouštějí a berou v potaz svoji pozici. Tyto informace využívají za účelem určení momentu postřelování a určení cíle střely.
	II.v.b Jaké vnitřní modely používají agenti k odhadu budoucích podmínek nebo následků svých rozhodnutí?	K předvídání pozic je použit přesný matematický model. Je využito numerické iterační metody sečen viz kapitola 6.5.4.
	II.v.c Mohou být agenti nepřesní v procesu předvídání a jak je to implementováno?	Ano, při postřelování mohou agenti vystřelit předtím, než doletí jiná střela, která může cíl zničit. Dále pokud palebný prvek postřeluje letoun, může dojít ke změně trajektorie letounu, v případě, že cíl letounu byl zničen a letoun tedy začne směřovat k novému cíli, případně pokud nemá další cíl tak se dá novou trajektorií na ústup.
II.vi Interakce	II.vi.a Jsou interakce mezi agenty a entitami přímé nebo nepřímé?	Interakce mezi agenty je přímá. letoun - bráněný objekt (útočník - cíl) obrný palebný prvek - letoun (obránce - nepřítel)

	<p>II.vi.b Na čem interakce závisí?</p>	<p>Interakce závisí na poloze, konkrétně na vzájemné vzdálenosti prvků. Dále je interakce ovlivněna terénem. Poslední faktor ovlivňující interakci je stav agentů (nečinný, střílí, nabíjí...).</p>
	<p>II.vi.c Pokud interakce zahrnují komunikaci, jak je tato komunikace reprezentována?</p>	<p>Komunikace v modelu není zahrnuta.</p>
	<p>II.vi.d Pokud existuje koordinační síť, jak to ovlivňuje chování agenta? Je struktura sítě předepsaná, nebo nově vzniká?</p>	<p>Koordinační síť není v modelu zahrnuta.</p>
II.vii Kolektivy	<p>II.vii.a Mohou agenti vytvářet nebo patřit k agregaci, která ovlivňuje a je ovlivňována jednotlivci? Jsou tyto agregace předepsány, nebo vznikají během simulace?</p>	<p>Agenti jsou reprezentováni jako jednotlivci. Jednotlivé typy agentů mohou mít více kategorií. Kategorie ovlivňuje pouze hodnoty jejich vlastností, nemají přímý vliv na chování.</p>
	<p>II.vii.b Jak jsou kolektivy reprezentovány?</p>	<p>Viz II.vii.a.</p>

II.viii Různorodost	II.viii.a Jsou agenti různorodí? Pokud ano, které proměnné a/nebo procesy se mezi agenty liší?	<p>Agenti se rozlišují na čtyři typy: letoun, obranný palebný prvek, střela a bráněný objekt.</p> <p>Všechny typy agentů mají konkrétní umístění v prostoru - palebný prvek a bráněný objekt jsou těsně nad terénem, letoun a střela jsou výše nad terénem. Rozdílnost vlastností lze najít v I.ii.b. Letouny nalétávají na bráněný objekt, a pokud můžou tak jej postřelují. Obranné palebné prvky postřelují letouny v jejich dostřelu. Střely jsou vypuštěny směrem k cíli, kde jsou zničeny a je rozhodnuto, jestli cíl zasáhly. Střely vypuštěné letounem letí směrem k bráněnému objektu. Střely vypuštěné palebným prvkem směřují k predikované pozici letounu.</p>
	II.viii.b Jsou agenti různorodí v procesu rozhodování? Pokud ano, které rozhodovací modely nebo rozhodovací objekty se mezi agenty liší?	Agenti jsou různorodí v procesu rozhodování v závislosti na jejich typu viz II.viii.a.
II.ix Náhodnost	II.ix.a Které procesy (včetně inicializace) jsou modelovány s předpokladem, že jsou náhodné nebo částečně náhodné?	Proces zásahu střely je náhodný. Před spuštěním simulace je volena pravděpodobnost, s kterou střela zničí cíl při jeho dosažení.
II.x Pozorování	II.x.a Jaká data jsou zaznamenávána z ABM pro testování, porozumění a analyzování, jak a kdy jsou	Je zaznamenávána procentuální úspěšnost poměru počtu nezničených bráněných objektů vůči celkovému počtu bráněných objektů. Dále je zaznamenáván poměr počtu sestřelených letounů vůči

		data zaznamenána?	celkovému počtu letounů.
		II.x.b Jaké klíčové výsledky, výstupy nebo charakteristiky modelu vytvářejí jednotlivci?	Klíčovým výsledkem je úspěšnost ubránění bráněných objektů, určená poměrem zničených a nezničených bráněných objektů. Sekundární ukazatel úspěšnosti je počet sestřelených letounů.
III. Detaily	III.i Detaily implementace	III.i.a Jak byl model implementován?	Model byl implementován v prostředí AnyLogic verze 7.3.3 Personal Learning Edition.
		III.i.b Je model přístupný, pokud ano pak kde?	Součástí el. verze DP.
	III.ii Inicializace	III.ii.a Jaký je počáteční stav modelu?	Počáteční stav je určen nastavením parametrů uživatele. Je určeno rozmístění prvků a jejich vlastnosti.
		III.ii.b Je inicializace pokaždé stejná, nebo se může mezi simulacemi lišit?	Počáteční stav se může mezi simulacemi lišit v závislosti na nastavení parametrů uživatelem, viz III.ii.a.
		III.ii.c Jsou počáteční hodnoty zvoleny libovolně nebo jsou založeny na datech?	Počáteční rozsahy hodnot jsou založeny na datech získané během konzultací s Ing. Vlastimilem Šloufem, Ph.D.
	III.iii Vstupní data	III.iii.a Používá model vstupy z externích zdrojů, například datových souborů nebo modelů?	Údaje o nastavení agentů se nastavují přímo v modelu. Externí zdroj je využit při načítání výškových dat ze souboru, dále jsou načítány externí soubory x3d, které představují vizuální 3D modely entit.

III.iv Submodely	III.iv.a Co jsou submodely reprezentující procesy zmíněné v sekci I.iii?	Pohyb agentů, postřelování agentů.
	III.iv.b Jaké jsou parametry submodelů, jejich dimenze a referenční hodnoty?	Viz kapitola 6.5.
	III.iv.c Jak byly submodely navrženy nebo zvoleny a jak byly parametrizovány a testovány?	Návrh submodelů je popsán v kapitole 6.5, testování je uvedeno kapitole 7.

Tabulka 3: Popis modele podle ODD+D [vlastní zpracování]

6.3 Uživatelské rozhraní a nastavení parametrů modelu

Před spuštěním simulace je potřeba nastavit parametry simulace a umístit prvky v prostředí. Uživatelské rozhraní je zobrazeno na obrázku 9 a obrázek 10 obsahuje detail ovládacích prvků. K umístění prvků slouží v levé části obrázek výškové mapy, kde lze umístit a odstraňovat prvky pomocí kliknutí myši. Provedená akce po kliknutí myši se provede v závislosti na vybraném přepínači (*radio button*). Přepínače se nachází ve spodní části bloku vpravo od výškové mapy. Všechny přepínače a popis jejich funkce je uvedena níže v tabulce 4.

Přepínač	Popis
add current Aircraft	Umožňuje kliknutím myši na mapě přidat letoun aktuálně vybrané kategorie.
add current Defence	Umožňuje kliknutím myši na mapě přidat obranný palebný prvek aktuálně vybrané kategorie.
add Protected Object	Umožňuje kliknutím myši na mapě přidat bráněný objekt.
remove entity	Umožňuje odebrat zvolený prvek z mapy.
set aircraft target	Umožňuje vybrat cíl zvoleného letounu, otevření dialogového seznamu, obsahujícího všechny bráněné objekty a možnost vybrání nejbližšího bráněného objektu.
remove all entities	Povolí použití tlačítka Remove all, které umožní následné smazání všech entit z mapy. Zvoleno jako ochrana před nechtěným mazáním.

Tabulka 4: Popis přepínačů uživatelského rozhraní [vlastní zpracování]

Ve stejném bloku je dále nad přepínači skupina zaškrťavajících polí (*checkbox*), které umožňují zvolit vykreslování některých pomocných prvků, přichycení umístěných agentů na nejbližší výškové body, nebo umožnění vypisování akcí a stavů agentů. Jako pomocné grafické prvky lze zobrazit popisek agentů, poloměr dostřelu palebných prvků, trajektorii letounů, odhadovaný čas příletu letounů nad bráněný objekt nebo oblast střetu rakety s letounem. Popis všech zaškrťavacích polí je uveden v tabulce 5.

Zaškrťavací pole	Popis
move entities to nearest height point	Souřadnice x, y všech agentů jsou posunuty na souřadnice nejbližšího výškového bodu. Při určení výšky prvků při inicializaci je pak využito vždy známé výšky a nedochází nikdy k interpolaci okolních hodnot.
enable Logs	Umožní výpis simulace. Je vypisováno zahájení a ukončení simulace. Akce a stav jednotlivých letounů: výstřel, nabíjení, změna cíle, pokud je letoun bez nábojů. Dále akce a stav palebných prvků: výstřel, nabíjení, počet letounů v dostřelu, který letoun je vybrán k postřelování. U střel je vždy vypisováno, jestli zasáhly nebo minuly cíl.
show Labels	Umožní zobrazení popisků ve 2D zobrazení pro všechny agenty.
show Fire radius	Zobrazí maximální teoretický dostřel všech obranných palebných prvků. Ve 3D je zobrazeno pomocí koule, ve 2D pomocí kruhu ve stejné výškové hladině jako se prvek nachází. Tyto pomocné vizuální prvky nejsou ovlivněny terénem. V případě že se letouny nachází v oblasti dostřelu, může právě terén znemožnit postřelování těchto letounů.
show Aircraft trajectory	Zobrazí trasu všech letounů.
show Impact position	Zobrazí kruhovou oblast, kde může dojít ke střetu rakety a letounu. Pokud letoun nezmění cíl, je ve středu této oblasti vyhodnoceno, zdali střela letoun zasáhla či nikoliv.
show Estimated time	Zobrazí ve 2D u popisku odhadovaný čas, který letounu zbývá k dosažení bráněného objektu.

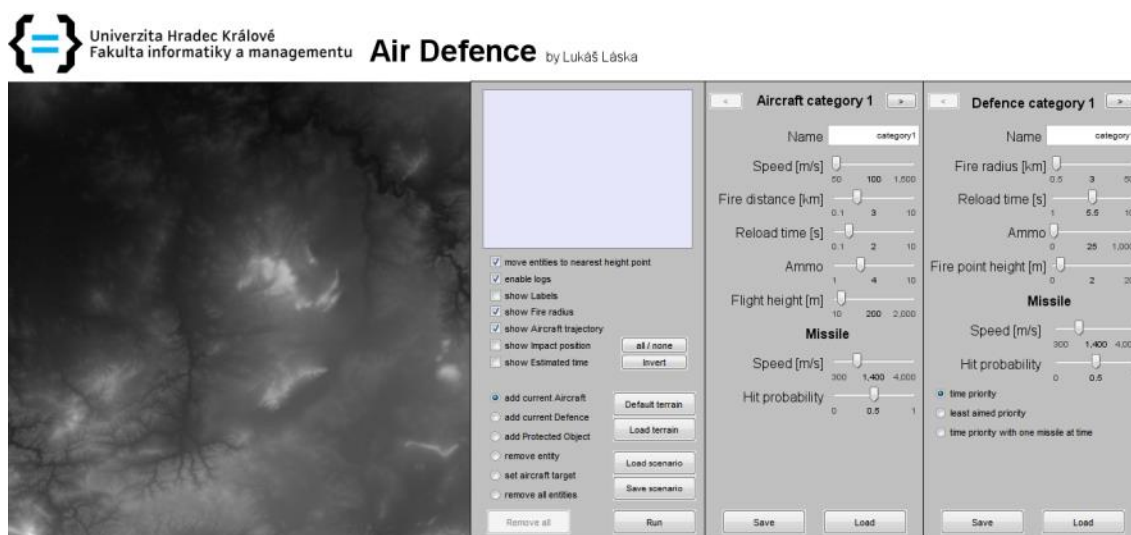
Tabulka 5: Popis zaškrťavacích polí uživatelského rozhraní [vlastní zpracování]

Posledním ovládacím prvkem tohoto bloku jsou tlačítka (*button*) umožňující nahrání externího terénu ve formátu x3d, tlačítka pro uložení a načtení nastavení modelu a tlačítko pro spuštění modelu. Všechna tlačítka a jejich funkce jsou uvedeny v tabulce 6.

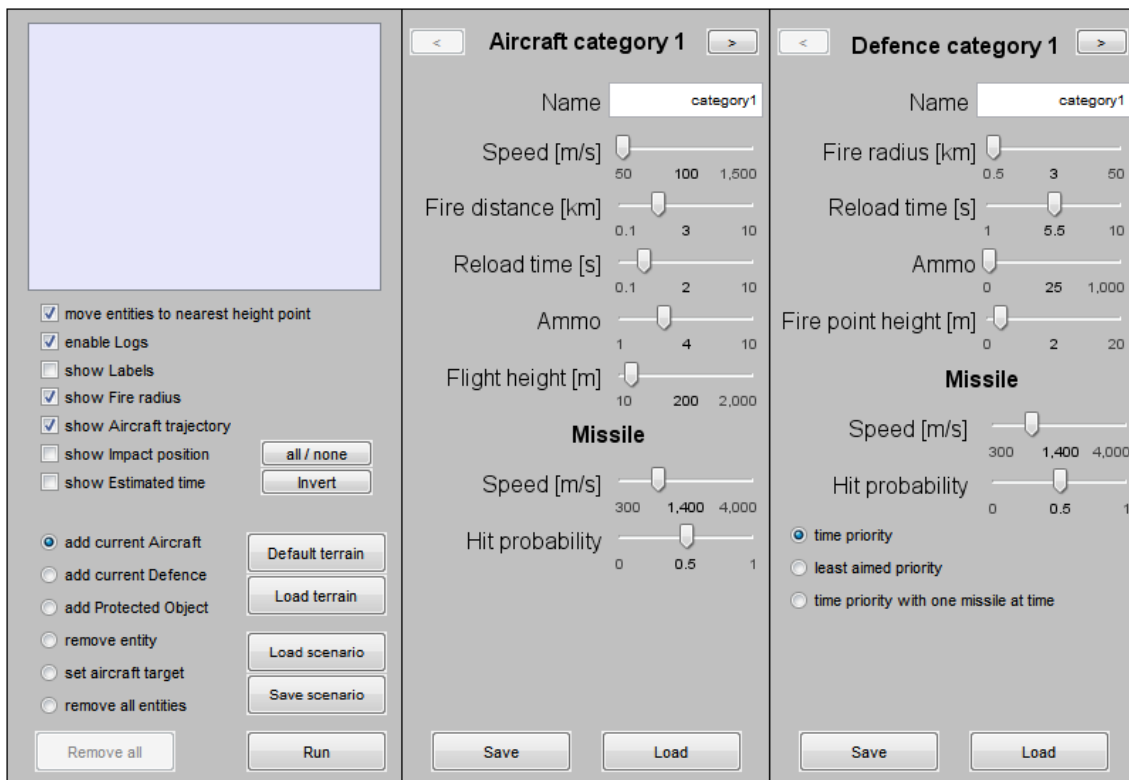
Tlačítko	Popis
all / none	Označí, případně odznačí všechna zaškrťovací pole.
Invert	Obrátí výběr všech zaškrťovacích polí.
Default terrain	Načte výchozí terén.
Load terrain	Umožní načíst externí terén ve formátu x3d. Pokud x3d soubor nespĺňuje nějakou podmínku pro úspěšné načtení je vypsána informace v horní oblasti bloku.
Save scenario	Uloží aktuální nastavení modelu do souboru xml. Je předpokládána schopnost uživatele zapisovat do umístění s modelem.
Load scenario	Umožní načíst dříve uložené nastavení modelu.
Remove all	Smaže všechny entity (letouny, obranné prvky, bráněné objekty) z mapy.
Run	Pokud simulace obsahuje alespoň jeden bráněný objekt, spustí model.

Tabulka 6: Popis tlačítek uživatelského rozhraní [vlastní zpracování]

Zbylé dva nadepsané bloky umožňují nastavit parametry letounů a obranných palebných prvků aktuálně vybrané kategorie. K přepínání aktuální kategorie slouží v horní části tlačítka, umístěná po stranách nadpisu. Nastavení většiny parametrů se provádí pomocí posuvníků (*slider*), které omezují množinu hodnot parametru na předem definované rozsahy. Dále lze zvolit názvy kategorií, které se zadávají do pole (*Edit box*) a u obranných palebných prvků lze pomocí přepínačů zvolit použitý algoritmus pro výběr cíle. Kromě nastavení samotných parametrů letounů a obranných prvků, je umožněno nastavení střel, které dané prvky používají.



Obrázek 9: Uživatelské rozhraní modelu [vlastní zpracování]



Obrázek 10: Detail ovládacích prvků uživatelského rozhraní [vlastní zpracování]

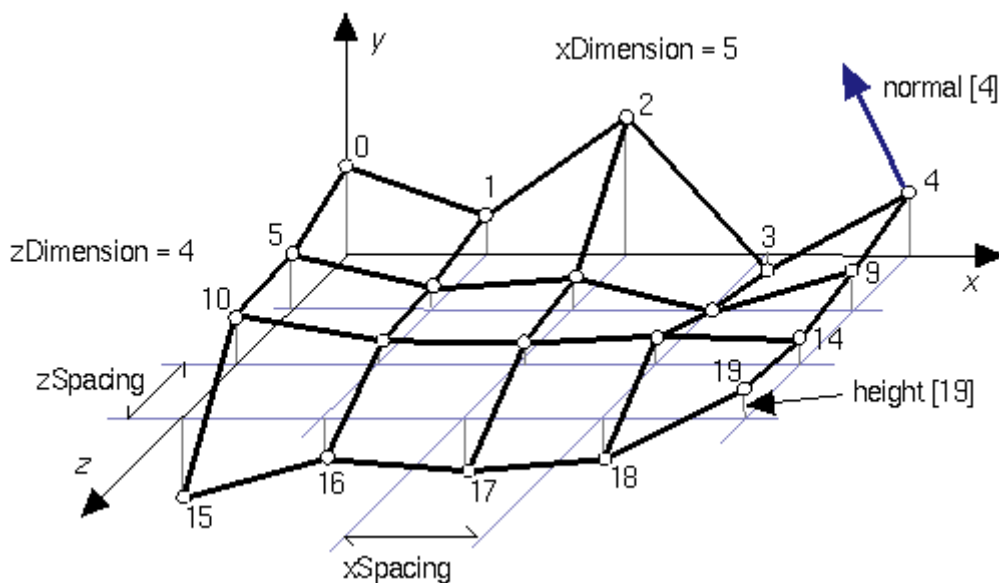
6.4 Prostředí

AnyLogic nemá žádný specializovaný nástroj na vizualizaci členitého terénu, je proto využito zobrazení pomocí x3d souboru popsaného v následující podkapitole. Prostředí je v modelu reprezentováno čtvercovou oblastí výškové mapy rovnoměrně uspořádané mřížky. Rozsah délky strany této oblasti je 10 až 100 km. Počet výškových bodů na stranu je libovolný (vždy ovšem stejný pro obě dimenze). Model má výchozí prostředí, které je reprezentováno výškovou mapou obsahující 250 · 250 bodů a délka strany oblasti je 50km. Prostředí ve vytvořeném modelu lze uživatelsky měnit načtením externího x3d souboru, který musí obsahovat právě jeden uzel *ElevationGrid*, jehož atributy *xDimension* a *zDimension* musí být uvedeny a musí mít stejnou hodnotu. To samé platí dále pro dvojici atributů *xSpacing* a *zSpacing*. Mechanismus načítání terénu předpokládá správnost poměrů mezi délkou strany oblasti a výškami bodů. Není zapotřebí mít údaje uvedeny v hodnotách konkrétních jednotek (např. metrů), při načtení terénu se tyto hodnoty v případě potřeby přepočítají (při zachování poměrů mezi výškami a délkou strany oblasti).

Prostředí ovlivňuje agenty, kteří se v něm nachází. Určuje umístění všech entit. Bráněný objekt a palebné obranné prvky jsou umístěny na povrchu terénu, letouny jsou umístěny nad terénem. Terén ovlivňuje také trajektorii letounů, které nemohou skrz něj prolétnout a schopnost postřelování, kdy prvky se nemohou postřelovat skrz terén.

6.4.1 Vizualizace a tvorba terénu

K vytvoření terénu je potřeba získat výšková data. K tomu bylo využito online nástroje dostupného na [28]. Tento nástroj umožňuje získat výšková data čtvercových oblastí od 64 do 3600 km² v podobě rastrového obrázku, z kterého lze vyčíst maximálně 255 různých výškových úrovní. Následně bylo nutno vytvořit x3d soubor, což je xml formát určený pro ukládání 3D scén. V uzlech scény a geometrie (*Scene* a *Shape*) je vnořen uzel pro zobrazení výškové mapy *ElevationGrid*. Schéma *ElevationGrid* je znázorněno na obrázku 11. Použité atributy tohoto uzlu jsou *solid*, *xDimension*, *xSpacing*, *zDimension*, *zSpacing* a *height*. *Solid* je atribut typu *SFBool* a určuje, jestli mají být viděny plochy terénu z obou stran, k čemuž dochází při hodnotě *false*. Atributy *xDimension* a *zDimension* jsou typu *SFInt32* a určují počet bodů pro osy *x* a *z*. Vlastnosti *xSpacing* a *zSpacing* jsou typu *SFFloat* a určují vzdálenost sousedních bodů na daných osách. Poslední uvedený atribut *height* obsahuje údaj o výškách bodů, je to pole hodnot s plovoucí desetinnou čárkou typ *MFFloat*. [29]



Obrázek 11: Schéma uzlu ElevationGrid [29]

6.5 Agenti

V simulaci se vyskytují agenti typu *Aircraft*, *Defense*, *Main*, *Missile* a *ProtectedObject*. *Main* je agent nejvyšší úrovně (*top-level agent*) představující prostředí. Obsahuje ostatní agenty, parametry modelu, pomocné globální proměnné nebo pomocné funkce, které mohou využívat i ostatní agenti. Také obsahuje opakované události (*Cyclic event*), které obstarávají aktualizaci překreslování pomocných prvků (např. popisky agentů) popsanych v kapitole 6.3 a kontrolují ukončující podmínky modelu.

Agent typu *Aircraft* představuje letoun, který se snaží zničit bráněný objekt. V prostředí je vizualizován modelem bojového letadla (*fighter*). Chování agenta je definováno pomocí stavového diagramu (*state chart*).

Defense reprezentuje obranný palebný prvek, jehož chování je opět určeno stavovým diagramem. Úkol palebného prvku je postřelovat letadla ve svém dosahu. Vizualně je v prostředí zobrazen pomocí modelu protiletadlového tanku. Tento model je získán z [30], a podle možností licence je upraven, kde princip úprav je snížení detailů a zjednodušení jeho geometrie, dále byly jednotlivé části modelu obarveny barvami namísto použití textur. Na konec musel být také model uložen ve formátu x3d.

Agent *Missile* představuje střelu, kterou mohou vystřelit agenti typu *Aircraft* nebo *Defence*. Při vytvoření každé instance střely je spočítána doba letu na základě zvolené rychlosti střely a dostřelu agenta, který střelu vypustil. Nejpozději po uplynutí této doby je střela zničena a odstraněna z modelu.

ProtectedObject reprezentuje bráněný objekt. Vizuálně je zobrazen jako model továrny (*factory*).

6.5.1 Parametry a proměnné agentů

Parametry a proměnné agentů jsou uvedeny v příloze 1 této práce.

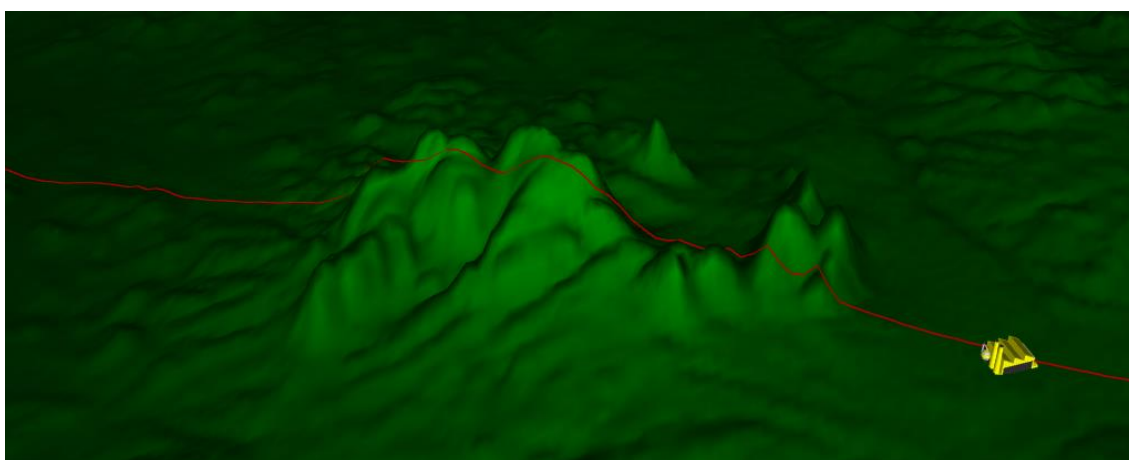
6.5.2 Počáteční rozmístění agentů

Letouny, obranné palebné prvky a bráněné objekty se dají umístit před spuštěním simulace. Umístit je lze pomocí dvojrozměrného obrázku mapy, kde jsou určeny pouze 2 ze souřadnic x, y . Výška je pak určena rozdílně podle typu agenta. Bráněný objekt a palebné prvky jsou umístěny ve výšce terénu. Pokud se tyto agenti nenachází přímo na výškovém bodě, je spočtena jejich výška interpolací okolních hodnot. Letouny jsou umístěny ve zvolené výšce nad terénem.

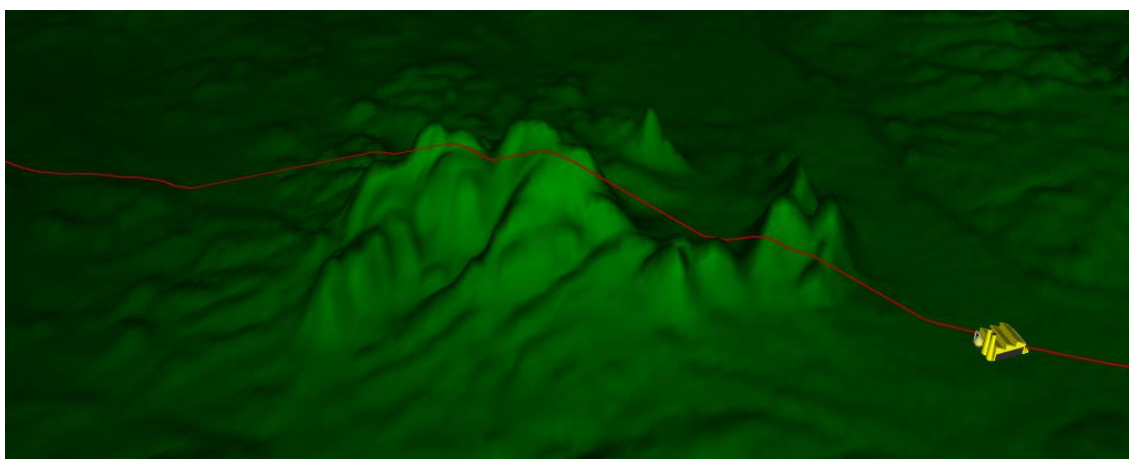
6.5.3 Pohyb agentů

Podobně jako u určení počáteční výšky agentů i pohyb agentů je dán jejich typem. Agenti typu bráněný objekt a obranný palebný prvek nevykonávají žádný pohyb. Naopak agenti reprezentující letouny a střely mají definovaný pohyb. Model simuluje přímý nálet, takže letouny vykonávají pohyb, při kterém mění pouze výšku letu, tak aby letěly nad terénem. Vzhledem k charakteristice tohoto pohybu je určena trasa při inicializaci agenta, případně při změně cíle, kde je určen koncový bod jeho trajektorie za bráněným objektem. Trajektorie letounu vzniká v několika fázích. V první fázi jsou získány body v konstantní výšce nad terénem ve směru letu na spojnicích 2 sousedních výškových bodů, případně pokud trajektorie prochází přímo výškovým bodem, použije se výška přímo nad tímto bodem. V další fázi pak dochází k úpravám, aby trajektorie byla plynulá, což má simulovat nemožnost letounů prudkých změn směrů. Nejprve jsou body procházeny po trojici. Pokud je prostřední z bodů níže, než oba krajní body je zvednut na hodnotu

průměru výšek těchto bodů. Pokud je prostřední bod nejvýše, zvedají se krajní body pouze v případě, že by zde letoun stoupal nebo klesal pod příliš vysokým úhlem. Výpočty jsou založené na goniometrii, kdy všechny body jsou v rovině stejně vzdálené a určí se maximální možný rozdíl výšky sousedních bodů. Další úprava spočívá v procházení bodů po dvojicích, kdy jsou zvedány jen ty druhé body, které jsou níže, než první bod o více než výše uvedený maximální rozdíl výšek. Procházení bodů po dvojicích je následně provedeno znovu v opačném pořadí, kdy se body začínají procházet od posledního k prvnímu bodu. Porovnání neupravené a upravené trajektorie je vizualizováno na obrázcích 12 a 13.



Obrázek 12: Neupravená trajektorie nad terénem [vlastní zpracování]

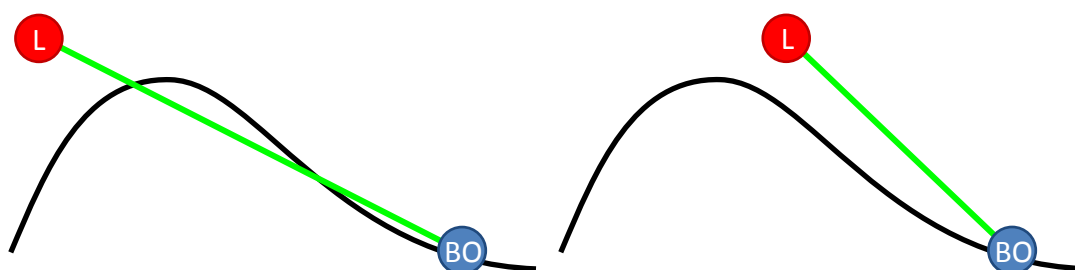


Obrázek 13: Upravená trajektorie nad terénem [vlastní zpracování]

Pokud je letoun zničen, jeho pohyb je zastaven a letoun je v modelu barevně odlišen tmavou barvou. Model nesimuluje pád letounu (ani případné škody způsobené jeho pádem). Letoun není z modelu zcela odstraněn, aby bylo možno případně analyzovat, ve kterém bodě došlo k jeho zničení.

6.5.4 Postřelování agentů

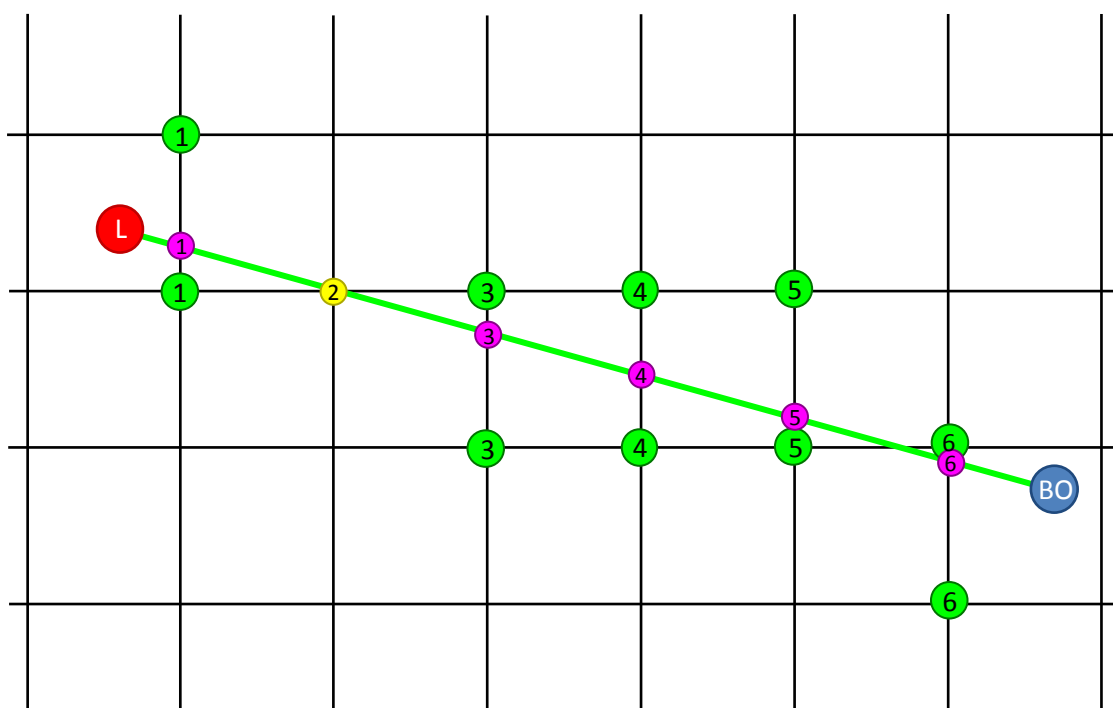
Schopnost postřelování mají letouny a obranné palebné prvky. Letouny postřelují pouze nehybný bráněný objekt. Letoun vystřelí jen tehdy, pokud je bráněný objekt v dostřelu, což znamená, že vzdálenost v prostoru mezi letounem a bráněným objektem je menší nebo rovna vzdálenosti dostřelu. Další nutnou podmínkou pro vystřelení je zjištění, jestli je mezi bráněným objektem a letounem terén. Tyto stavy jsou ilustrovány na obrázku 14, kde je profil terénu zobrazen černě, letoun prezentován červeně a bráněný objekt modře. Obrázek ilustruje vlevo situaci, kdy nelze postřelovat z důvodu přítomnosti terénu. Vpravo je znázorněna situace, kde letoun pokročil ve své trajektorii a postřelovat již může.



Obrázek 14: Znázornění vlivu terénu na schopnost postřelování [vlastní zpracování]

Ke zjištění kolize s terénem je využito principu přímé viditelnosti (*line of sight*) [31] mezi dvěma body. Pro implementaci je vytvořena funkce, která vrátí *true* v případě, že letoun může postřelovat, v opačném případě je vrácena hodnota *false*. Funkce přijímá jako argument 2 body (konkrétně dvě tříprvkové pole, jehož prvky jsou datového typu *double*), polohu letounu a bráněného objektu. Na pořadí bodů nezáleží, algoritmus body v případě potřeby prohodí. Princip metody a její důležité prvky jsou zobrazeny na obrázku 15, kde je shora černě znázorněna výšková mapa, červeně je znázorněn letoun, modře bráněný objekt a zeleně úsečka, která je spojuje. Na této úsečce je na vyznačených bodech (žlutý, a fialové) porovnávána výška s terénem. Dále jsou zde označeny zeleně dvojice výškových bodů (dvojice jsou tvořeny body se stejnými čísly), které slouží k vypočtení výšky terénu v bodě mezi nimi pomocí lineární interpolace (ružové body). Pokud je všech 6 výškových

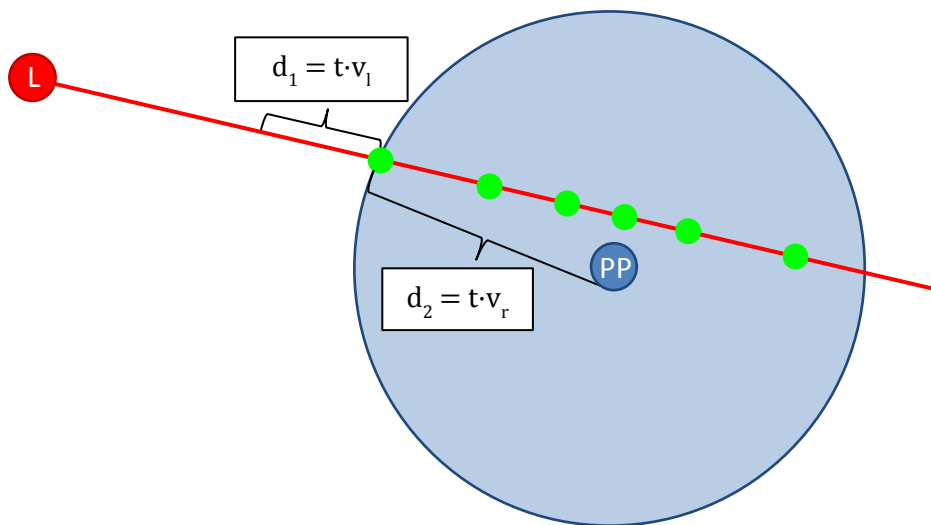
hodnot úseček větších než hodnoty terénu, je terén „pod úsečkou“ a letoun tedy může vystřelit. Jestliže je alespoň jeden bod terénu výše než výška úsečky v daném bodě, nelze letoun postřelovat. Ke konkrétní implementaci je potřeba dodat informaci o ose, po které se jednotlivé body prochází. V ilustrované situaci je to osa x . Osa je určena porovnáním absolutních hodnot rozdílů souřadnic x a y letounu a bráněného objektu. Pokud je absolutní hodnota rozdílu souřadnic y větší, než absolutní hodnota rozdílu souřadnic x , je volena pro procházení osa y , v opačných případech je volena osa x (pozn. při rovnosti absolutních hodnot rozdílů lze obecně volit libovolnou osu, pro konkrétní implementaci v modelu je vždy využita osa x).



Obrázek 15: Znázornění funkce a klíčových prvků využívající princip přímé viditelnosti [vlastní zpracování]

Agenti typu obranný palebný prvek mají také schopnost postřelování. Stejně jako letouny postřelují jen v případě, že mezi nimi není v přímé linii vyvýšený terén. Palebné prvky ovšem postřelují pohybující se letouny a je proto potřeba zajistit, aby došlo ke střelbě ve správný moment. Obranné prvky postřelují letoun dříve, než se nachází v dostřelu, aby ke střetu rakety a letounu došlo právě na hranici dostřelu (je započítán čas letu rakety na místo srážky s letounem). Tato metoda postřelování se využívá v reálných situacích a byla implementována na základě konzultací s odborníky. Situace je analyticky znázorněna na obrázku 16. Zde je

červeně znázorněn letoun a jeho přímá trajektorie, modře palebný prvek a jeho dostřel. Zeleně jsou označena místa, střetu střel s letounem. Tato místa střetu jsou očíslována podle pořadí. Pokud by střela nezasáhla letoun při prvním střetu, může dojít k zásahu v dalších následujících zeleně vyznačených bodech. Vzniklé mezery mezi těmito body jsou zapříčiněny dobou nabíjení (a samozřejmě následně časem potřebným střelou k dosažení bodu). Ze znázorněné situace lze vidět, že první střela je vypuštěna dříve, než je letoun v dostřelu. Znázorněná situace předpokládá, že letoun letí pomaleji než vypuštěná střela, platí tedy vztah $v_l < v_r$. Za stejný čas t tedy letoun a střela uletí rozdílné vzdálenosti označené d_1 a d_2 . Čas t je pro obě rovnice stejný. Jeho velikost lze v prvním bodě střetu snadno určit. Vzhledem k omezenému dostřelu palebného prvku, urazí střela právě tuto vzdálenost konstantní rychlostí. Vztahem $\frac{d_2}{v_r}$ je možné spočítat maximální možný čas letu střely. Jak je uvedeno v kapitole 5, pro numerické řešení výpočtu času lze využít iterační metody. Podle [32] je využito metody sečen, kde je dostupná i implementace kódu, která je upravena, pro potřeby modelu. Metoda je volána každých 0,05 vteřin. Argumenty metody jsou souřadnice letounu, jeho směr a rychlost letu, souřadnice palebného prvku, jeho dostřel a rychlost používané střely. Při předání těchto parametrů lze v metodě určit počáteční intervalu hledaných časů. Minimální čas je stanoven 0 a maximální podle již uvedeného vztahu podílem dostřelu palebného prvku a rychlosti rakety. Metoda má pevně stanovený maximální počet iterací na 40. Při dosažení tohoto limitu je o tom vypsána informace, a prvek nebude postřelovat. Během vývoje a následného testování k takové situaci ovšem nedošlo.



Obrázek 16: Analytické znázornění postřelování letícího letounu [vlastní zpracování]

6.5.5 Algoritmy postřelování letounů

Pro obranné palebné prvky byly vytvořeny 3 algoritmy postřelování, které určují prioritu výběru cílů. První z nich vybírá prioritně cíle, které doletí nad bráněný objekt v nejkratším čase. Druhý algoritmus preferuje cíle, na které letí méně raket. Tyto 2 algoritmy mají společnou vlastnost, že vždy když existuje alespoň jeden cíl, který je možné postřelovat (letoun není schovaný za terénem), vypustí střelu. To může způsobit, že na letoun může letět v jeden okamžik více než 1 střela. Poslední algoritmus je úpravou algoritmu prvního, kdy jsou postřelovány primárně letouny, které doletí nad bráněný objekt v nejkratším čase a zároveň je na letoun vystřelena maximálně 1 střela. To simuluje schopnost šetřit zdroji (municí), kdy je vypuštěna jedna střela a následně se čeká, jestli cíl zasáhne. Pokud ano, není potřeba další rakety, pokud ne je vystřelena nová raketa, u které se opět čeká, jestli cíl zasáhne.

7 Experimenty provedené na modelu

Pro vytvoření experimentů disponuje AnyLogic několika nástroji. Ve verzi PLE jsou dostupné konkrétně 3 z nich *Simulation*, *Optimization* a *Parameter Variation*. Využit je experiment pro variaci parametrů (*parametr variation*), umožňující opakovaný běh modelu s různými kombinacemi hodnot parametrů. Pro nastavení experimentu je využito upravené uživatelské rozhraní popsané v kapitole 6.3. Jednotlivé simulace experimentu nejsou vizualizovány, a proto byly z rozhraní odstraněny zaškrtačací pole, ovlivňující vykreslení pomocných prvků. Dále je zde přidáno pole pro zadání počtu iterací, jednoho obranného uskupení. Vzhledem k použitým datovým strukturám jako jsou např. pole nebo *ArrayList* nelze přímo využít připravené funkce *Varied in range*, kde lze stanovit minimální a maximální hodnotu parametru a krok, s kterým se hodnota parametru zvyšuje. Experiment pro variaci parametrů, umožňuje volbu vlastního způsobu zadání variace (*Freeform*), ve které se dají hodnoty parametrů vyjádřit pomocí výrazu (*java expression*). Experiment umožňuje 2 přístupy, kdy jeden z přístupů vyhledává nejvýhodnější postavení zvoleného počtu obranných prvků ve vybrané obdélníkové oblasti. Oblast je rozdělena na volitelný počet podoblastí, kde v každé podoblasti se vybere nejvyšší bod pro umístění palebného prvku. Druhý z přístupů umožňuje porovnání zvoleného počtu obranných prvků na zvolených pozicích, kde počet pozic může být větší, než počet obranných prvků. Po skončení experimentu je na mapě vždy vyobrazena nejúspěšnější sestava. V případě že je těchto sestav víc, je vyobrazena pouze jedna.

Účel tohoto experimentu je získat výsledná data o úspěšnosti postavení palebných prvků. Neměnnými parametry experimentu jsou počet iterací pro každé sestavení parametrů, pozice letounů a jejich vlastnosti, kdy lze využít až 10 různých kategorií letounů. Další konstantní parametry jsou vlastnosti obranných prvků všech kategorií a počet prvků dané kategorie. Naopak parametry pozic obranných prvků se budou lišit. Na základě zvoleného počtu palebných prvků jednotlivých kategorií, se principem variace bez opakování sestaví všechny možnosti postavení prvků. Pro každé postavení je simulace spuštěna vícekrát v závislosti na zvolené hodnotě počtu iterací. Výsledky experimentu jsou po jeho skončení uloženy do souboru csv,

který obsahuje informace o vstupech experimentu a data jednotlivých běhů simulace. Zaznamenány jsou číslo běhu simulace, doba trvání simulace, označení aktuální sestavy číslem, pozice palebných prvků, počet vystřelených raket palebných prvků, počty zničených a nezničených letounů a bráněných objektů.

Pro otestování vlivu parametrů, je vybrána situace náletu jednoho letounu na jeden bráněný objekt, který je bráněn jedním palebným prvkem. Pozice bráněného objektu a letounu byly zvoleny tak, aby se mezi nimi nacházela vyvýšenina. Pozice palebného prvku byla stanovena experimentem popsáním v následující podkapitole 7.1.

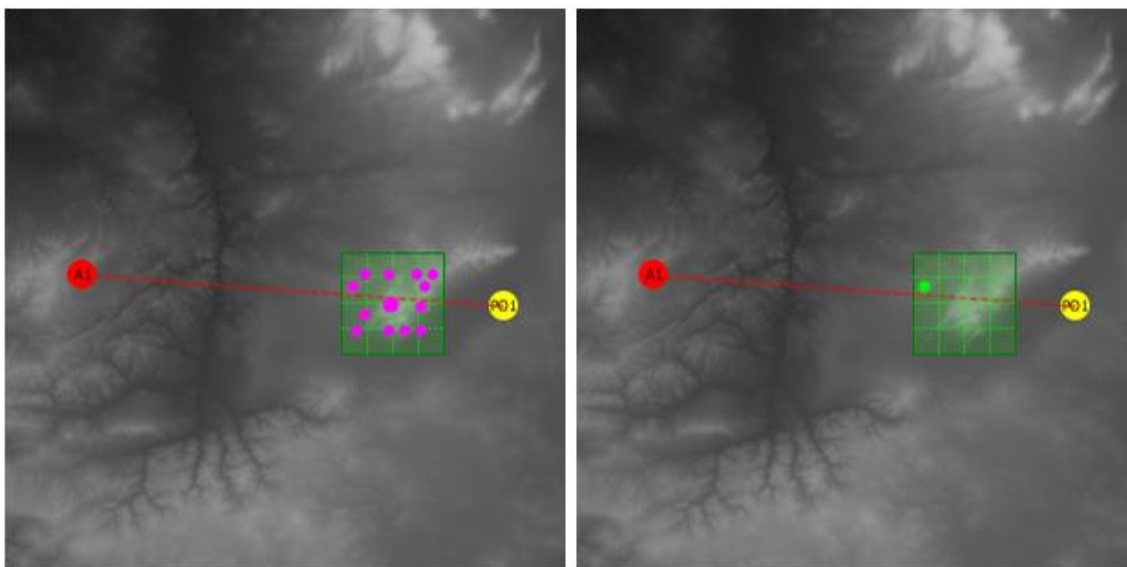
7.1 Určení výchozího postavení palebného prvku

Pro experiment je vybrána metoda, určující nejúspěšnější postavení palebného prvku v oblasti. Kompletní zadání celého experimentu je v tabulce 7. Všechny experimenty jsou provedeny pro 10000 iterací každého unikátního nastavení, z důvodu přítomnosti náhodnosti zásahu raket.

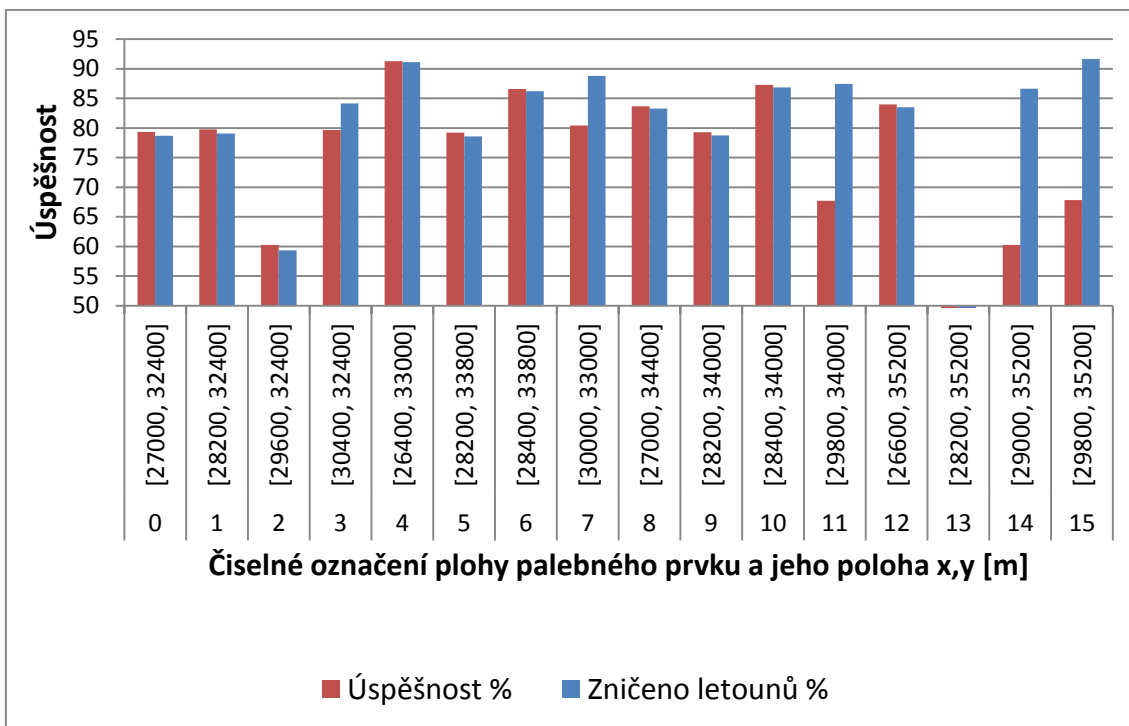
Experiment		Určení výchozího postavení palebného prvku	
Typ experimentu	Vyhledání nejlepšího postavení v obdélníkové oblasti (16 možností)		
Počet iterací pro jednu sestavu	10000		
Počet kategorií letounů	1		
Počet kategorií palebných prvků	1		
Počet bráněných objektů	1		
Letouny		Palebné prvky	
Počet letounů	1	Počet palebných prvků	1
Rychlost	100 m/s	Poloměr dostřelu	3 km
Dostřel	3 km	Čas mezi výstřely	5,5 s
Čas mezi výstřely	2 s	Počet střel	25
Počet střel	4	Výška bodu výstřelu nad terénem	2 m
Minimální výška letu	200 m	Rychlost střely	1400 m/s
Rychlost střely	1400 m/s	Pravděpodobnost střely zasáhnout cíl	0,2
Pravděpodobnost střely zasáhnout cíl	0,6	algoritmus postřelování	postřelování nejbližších

Tabulka 7: Vstupy experimentu pro určení výchozí pozice palebného prvku [vlastní zpracování]

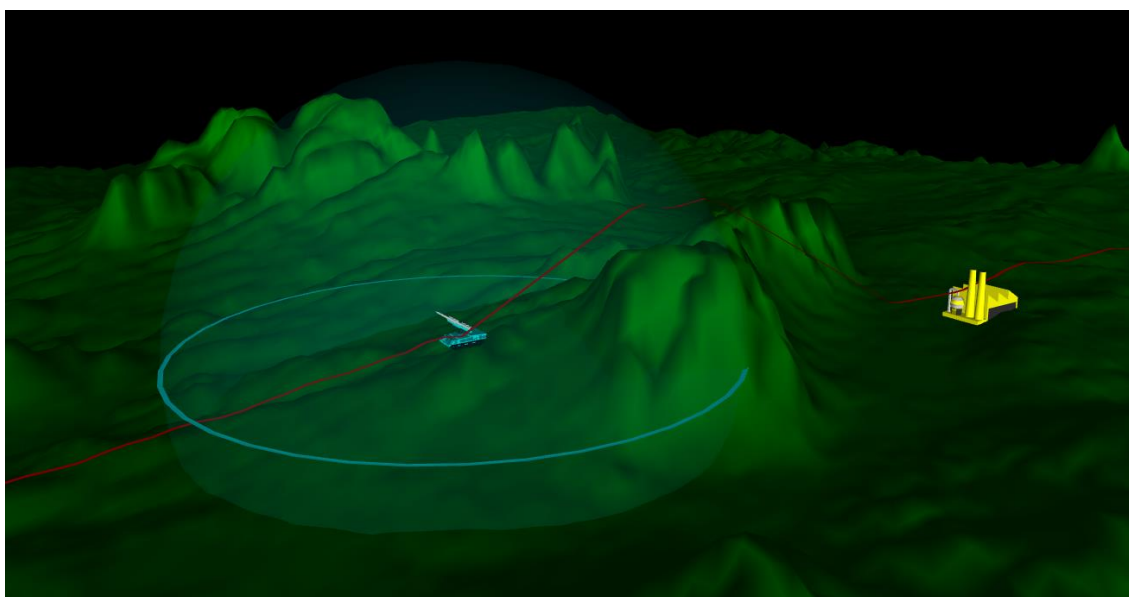
Výsledky experimentu jsou znázorněny v grafu 1, kde je uvedena úspěšnost ubránění objektu jednotlivých rozmístění palebných prvků spolu s počtem sestřelených letounů. Z grafu je patrné, že nejúspěšnější pozice číslo 4, nemá nejvíce sestřelených letounů, ale přesto tato pozice ubránila objekt nejčastěji. Palebný prvek umístěný na pozici 15 zničil letounů více, ale za to nedokázal ubránit bráněný objekt s takovou úspěšností. To znamená, že takto umístěný prvek zničil letoun často příliš pozdě, v době kdy už letoun stihl vystřelit na bráněný objekt a následně došlo k jeho zničení. Z pozice číslo 13 nedokázal palebný prvek postřelovat letoun, a případy kde nedošlo ke zničení bráněného objektu, jsou pouze, když všechny střely letounu minuly. Na obrázku 17 je nastavení umístění prvků vlevo a výsledek experimentu s nejúspěšnějším postavením vpravo. Obrázek 18 zobrazuje nejúspěšnější umístění (4) palebného prvku v prostoru, obrázek 19 pak zobrazuje nejhorší umístění (13), kdy palebný prvek není schopen letoun postřelovat. Pro další experimenty týkající se vlivu jednotlivých parametrů na výsledky experimentu, bude použito postavení číslo 4.



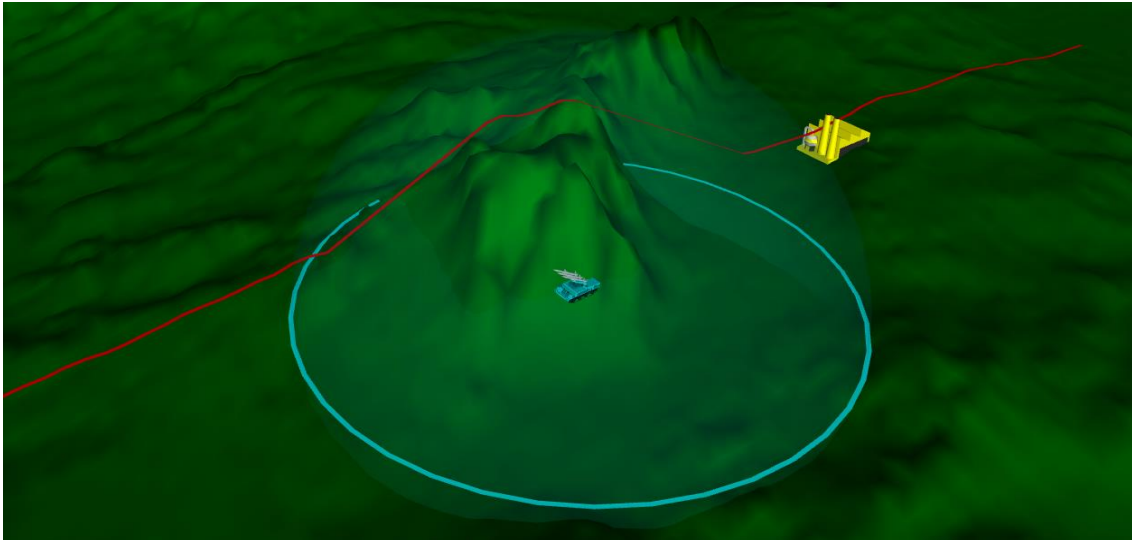
Obrázek 17: Zadání oblasti experimentu a jeho výsledná pozice [vlastní zpracování]



Graf 1: Úspěšnost ubránění jednotlivých pozic palebného prvku [vlastní zpracování]



Obrázek 18: Vizualizace nejúspěšnější pozice [vlastní zpracování]



Obrázek 19: Vizualizace nejméně úspěšné pozice [vlastní zpracování]

7.2 Vlivy jednotlivých parametrů

V následujících experimentech budou testovány vlivy jednotlivých parametrů palebného prvku na úspěšnost obrany bráněného objektu. Tyto experimenty jsou uvedeny v podkapitolách 7.2.1 až 7.2.12. Parametry pro všechny tyto experimenty jsou stejné s výjimkou vždy právě testovaného parametru. V tabulce 8 jsou uvedeny výchozí hodnoty parametrů a v tabulkách 9 a 10 jsou uvedeny hodnoty testovaných parametrů pro obranné palebné prvky a letouny.

Experiment	Výchozí hodnoty následujících experimentů		
Typ experimentu	Kombinace zadaných pozic (1 pozice)		
Počet iterací pro sestavu	10000		
Počet kategorií letounů	1		
Počet kat. palebných prvků	1		
Počet bráněných objektů	1		
Letouny		Palebné prvky	
Počet letounů	1	Počet palebných prvků	1
Rychlost	200 m/s	Poloměr dostřelu	3 km
Dostřel	3 km	Čas mezi výstřely	5,5 s
Čas mezi výstřely	2 s	Počet střel	25
Počet střel	4	Výška bodu výstřelu nad terénem	2 m
Minimální výška letu	500 m	Rychlost střely	1400 m/s
Rychlost střely	1400 m/s	Pravděpodobnost střely zasáhnout cíl	0,15
Pravděpodobnost střely zasáhnout cíl	0,7	algoritmus postřelování	postřelování nejbližších

Tabulka 8: Výchozí hodnoty parametrů experimentů zkoumající vlivy jednotlivých parametrů palebného prvku [vlastní zpracování]

Parametr	Hodnoty oddělené středníkem
Poloměr dostřelu [km]	0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10
Čas mezi výstřely [s]	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10
Počet střel	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8
Výška bodu výstřelu nad terénem [m]	0; 0,1; 10; 20
Rychlost střely [m/s]	300; 4000
Pravděpodobnost střely zasáhnout cíl	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5

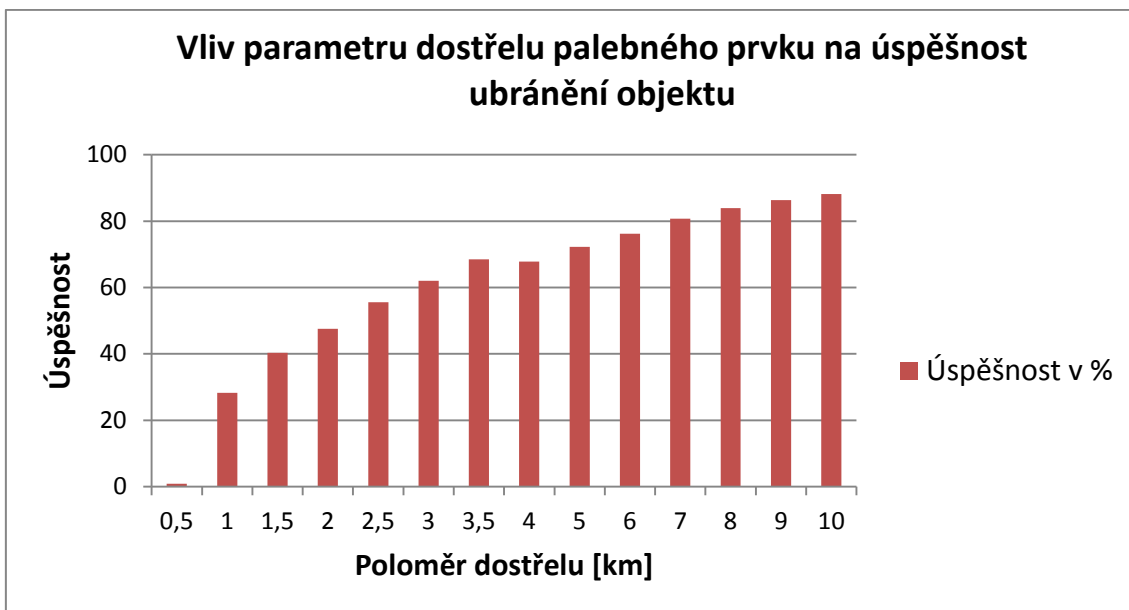
Tabulka 9: Jednotlivé hodnoty testovaných parametrů palebného prvku [vlastní zpracování]

Parametr	Hodnoty oddělené středníkem
Rychlost letu [m/s]	50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 1100
Dostřel [km]	0,5; 2; 4; 6; 8; 10
Počet střel	1; 2; 3; 4
Minimální výška letu nad terénem [m]	10; 100; 200; 400; 800; 1200; 1600; 2000
Rychlost střely [m/s]	300; 4000
Pravděpodobnost střely zasáhnout cíl	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7

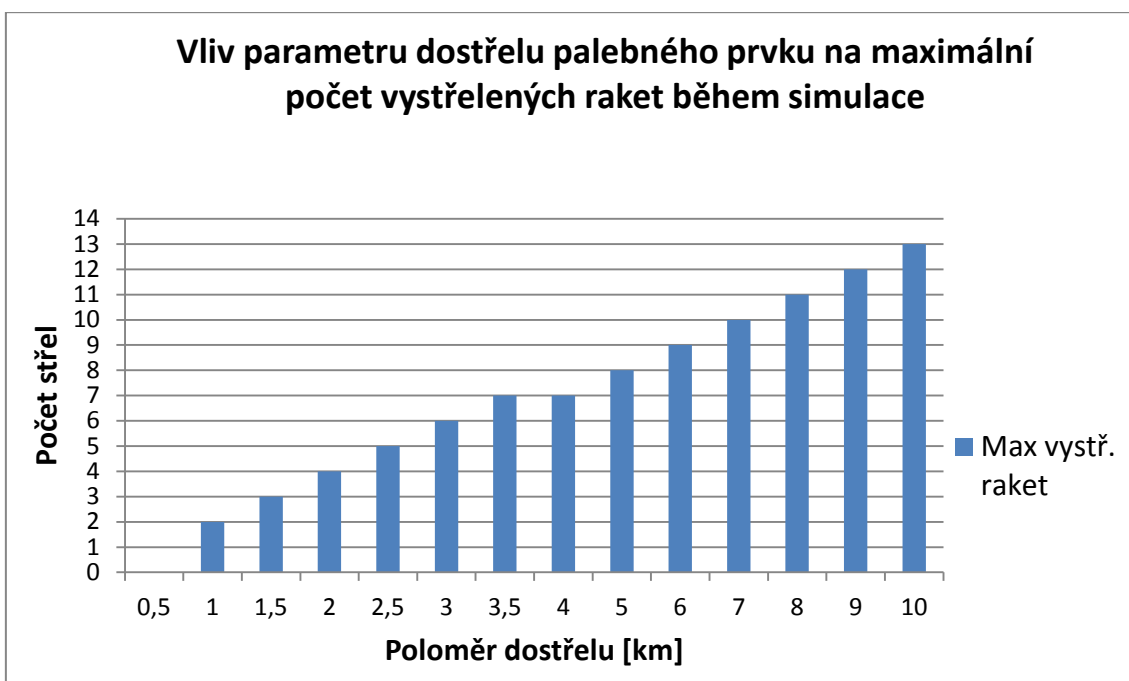
Tabulka 10: Jednotlivé hodnoty testovaných parametrů letounu [vlastní zpracování]

7.2.1 Vliv parametru dostřelu palebného prvku

Parametr dostřelu je testován v rozsahu od 0,5 do 10 km. Předpokladem experimentu je, že s rostoucím dostřelem se zvýší úspěšnost ubránění objektu. Výsledky experimentu jsou uvedeny v grafu 2, kde je zachycena úspěšnost ubránění objektu pro jednotlivé hodnoty dostřelu palebného prvku. S rostoucím dostřelem se úspěšnost zvyšuje, až na dvojici dostřelů 3,5 a 4 km. Zde je mírný pokles způsobený, náhodností zásahu. Dále je zde uveden graf 3, ve kterém je zachycen maximální počet raket, který palebný prvek stihl vypustit. Je zde patrné, že pro výše uvedenou dvojici palebný prvek vystřelil v obou případech stejný maximální počet střel a zvýšení parametru zde pro konkrétní nastavení celého scénáře nepřinesl žádný užitek. Pro poloměr dostřelu 0,5 km bylo zjištěno, že vzhledem k minimální výšce letounu 500 m, nebyl palebný prvek schopný letoun postřelovat a do modelu byla následně přidána kontrola vstupů, která kontroluje, jestli je minimální výška letu letounu menší než dostřel palebného prvku.



Graf 2: Úspěšnost jednotlivých poloměrů dostřelu palebného prvku [vlastní zpracování]

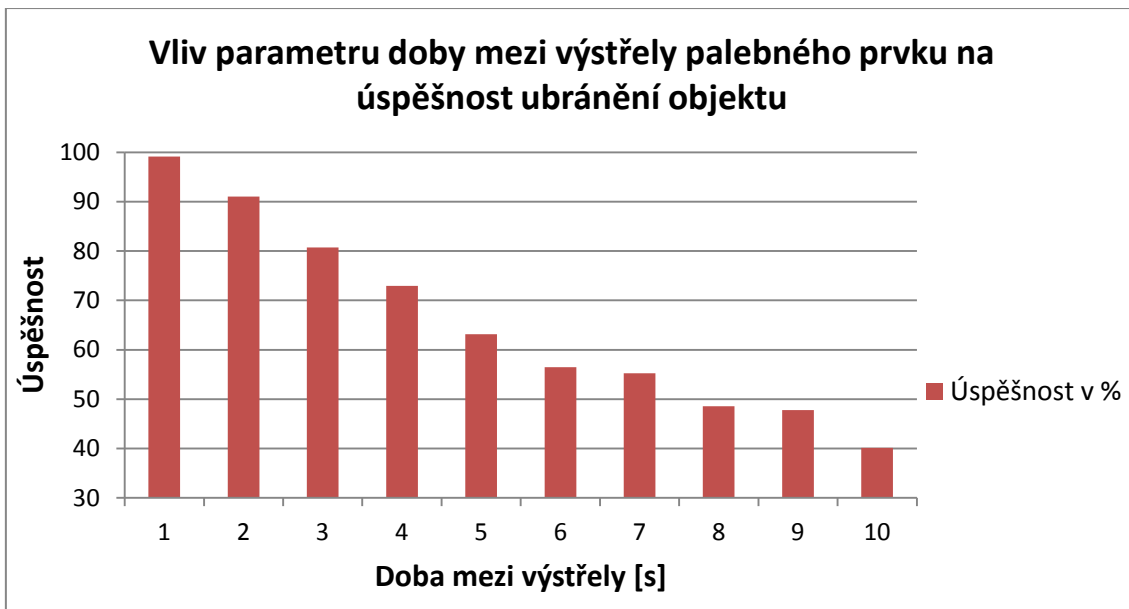


Graf 3: Maximální počet vystřelených střel palebného prvku jednotlivých poloměrů dostřelu [vlastní zpracování]

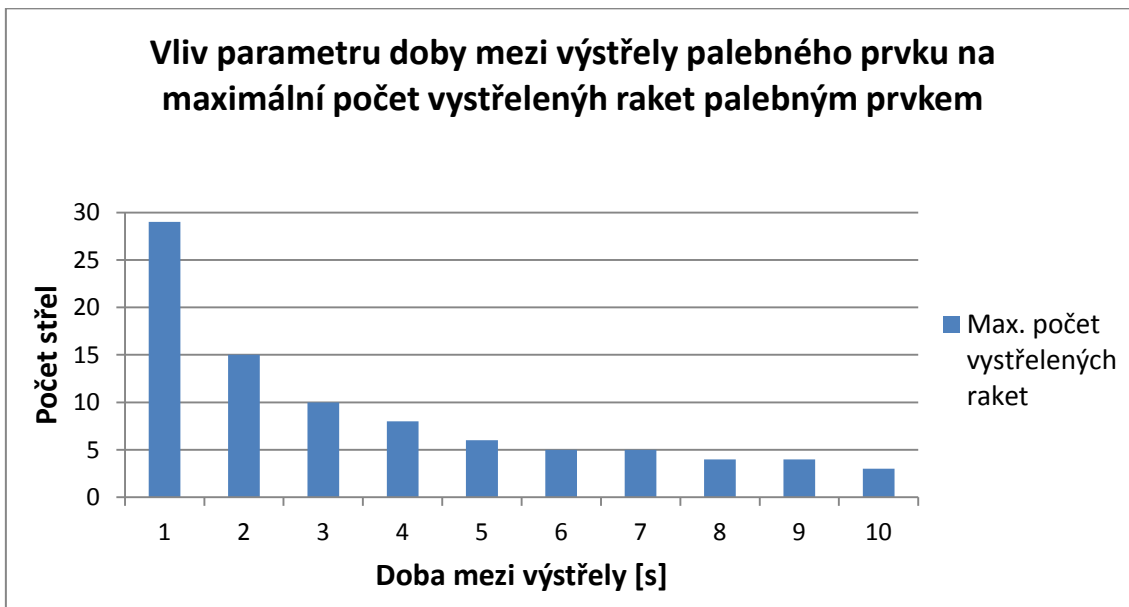
7.2.2 Vliv parametru času mezi výstřely palebného prvku

Parametr času mezi výstřely je testován v rozsahu od 1 do 10 s. Předpokladem experimentu je, že nižší hodnoty doby mezi výstřely budou mít vyšší úspěšnost. Výsledek úspěšnosti je uveden v grafu 4, a graf 5 zachycuje maximální počet vypuštěných střel v jednom simulovaném běhu. Až na hodnoty doby mezi výstřely

8 a 9 se úspěšnost podle předpokladu snižuje. To je opět způsobeno náhodností zásahu. Z grafu 5 lze ověřit podle počtu vystřelených raket, že pro dvojice hodnot 6, 7 a 8, 9 je vystřelen stejný maximální počet raket, což se v grafu 4 projevuje tak, že tyto dvojice mají nejmenší rozdíly úspěšností.



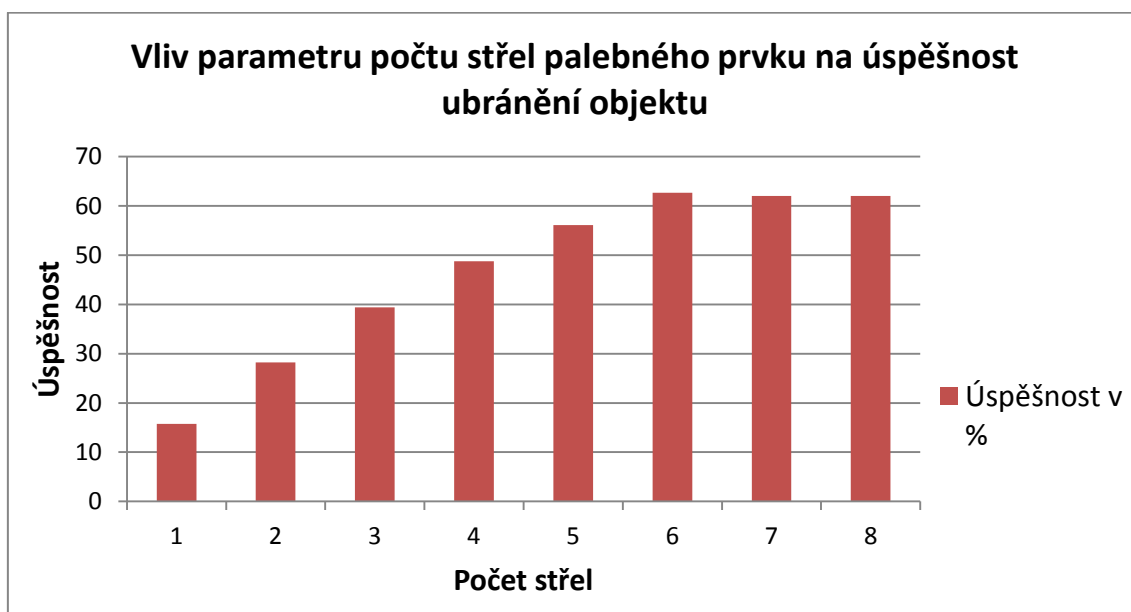
Graf 4: Úspěšnost jednotlivých časů mezi výstřely palebného prvku [vlastní zpracování]



Graf 5: Maximální počet vystřelených raket palebného prvku jednotlivých hodnot časů mezi výstřely [vlastní zpracování]

7.2.3 Vliv parametru počtu střel palebného prvku

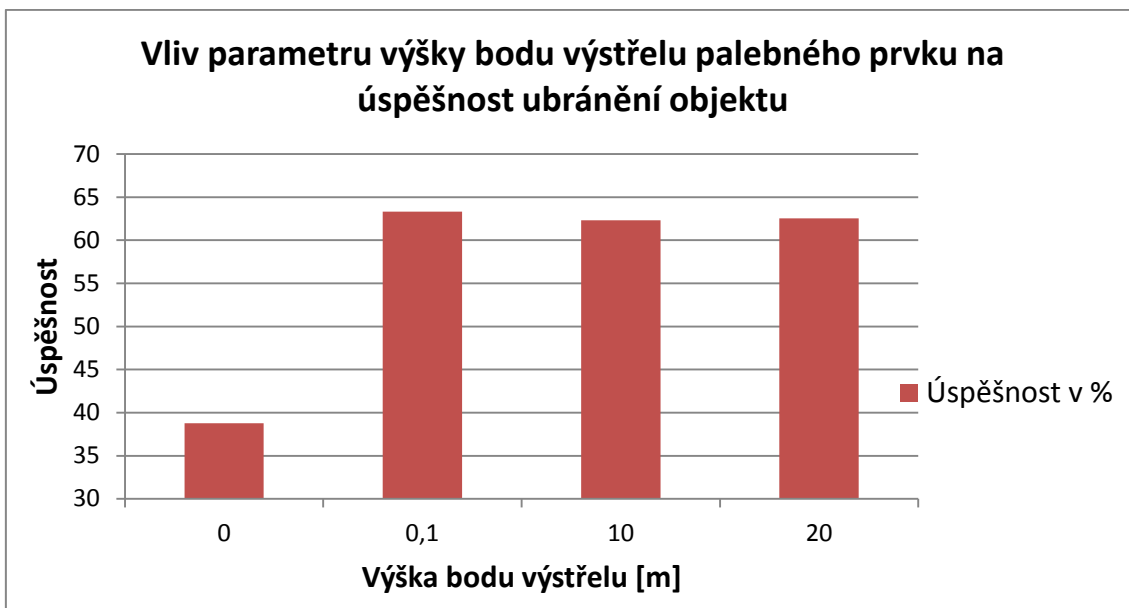
Parametr počtu střel je testován v rozsahu od 1 do 8. Předpokladem experimentu je, že nižší hodnoty počtu střel budou mít nižší úspěšnost. Výsledek úspěšnosti je uveden v grafu 6, kde je patrné, že se s více střelami zvedá úspěšnost. Jako v předcházejících případech i zde lze pozorovat drobnou nepřesnost způsobenou náhodností zásahu v případě 7 střel. Dále lze sledovat, že s růstem počtu střel, se úspěšnost zvyšuje méně.



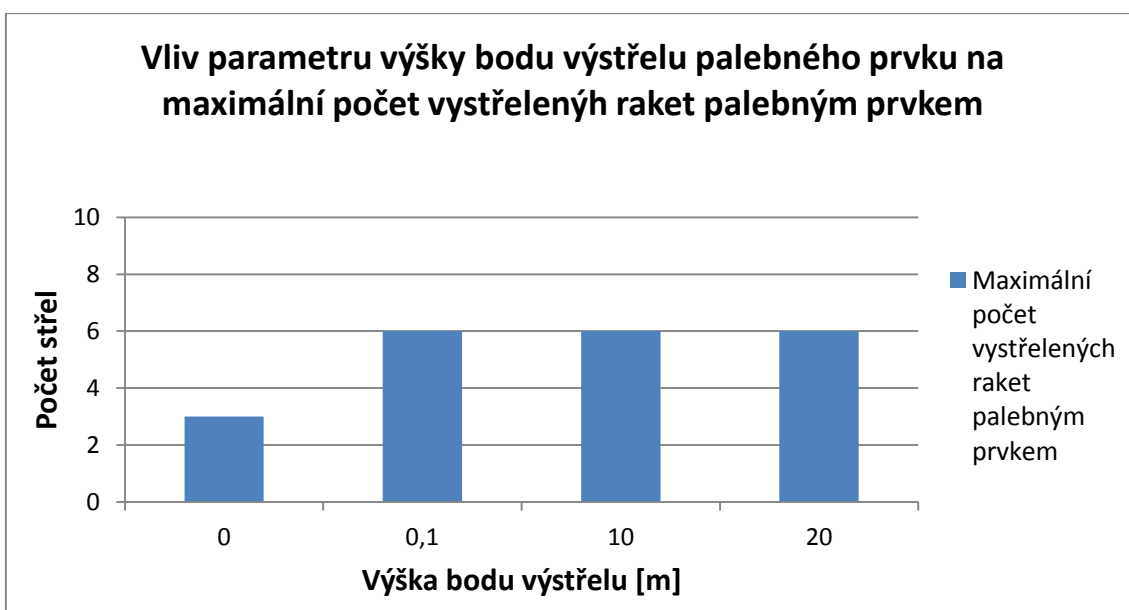
Graf 6: Úspěšnost jednotlivých hodnot počtu střel palebného prvku [vlastní zpracování]

7.2.4 Vliv parametru výšky bodu výstřelu palebného prvku

Parametr výšky bodu výstřelu nad terénem je testován v rozsahu od 0 do 20m. Předpokladem experimentu je, že nižší hodnoty mohou způsobit horší schopnost postřelování z důvodu přítomností vyššího okolního terénu. Pro testované hodnoty 0, 0,1, 10, 20 metrů se zhoršení projevilo pouze pro hodnotu 0, kdy se snížil i maximální počet vystřelených raket viz grafy 7 a 8.



Graf 7: Úspěšnost jednotlivých výšek bodu výstřelu palebného prvku [vlastní zpracování]



Graf 8: Maximální počet vystřelených raket jednotlivých hodnot výšek bodu výstřelu palebného prvku [vlastní zpracování]

7.2.5 Vliv parametru rychlosti střely palebného prvku

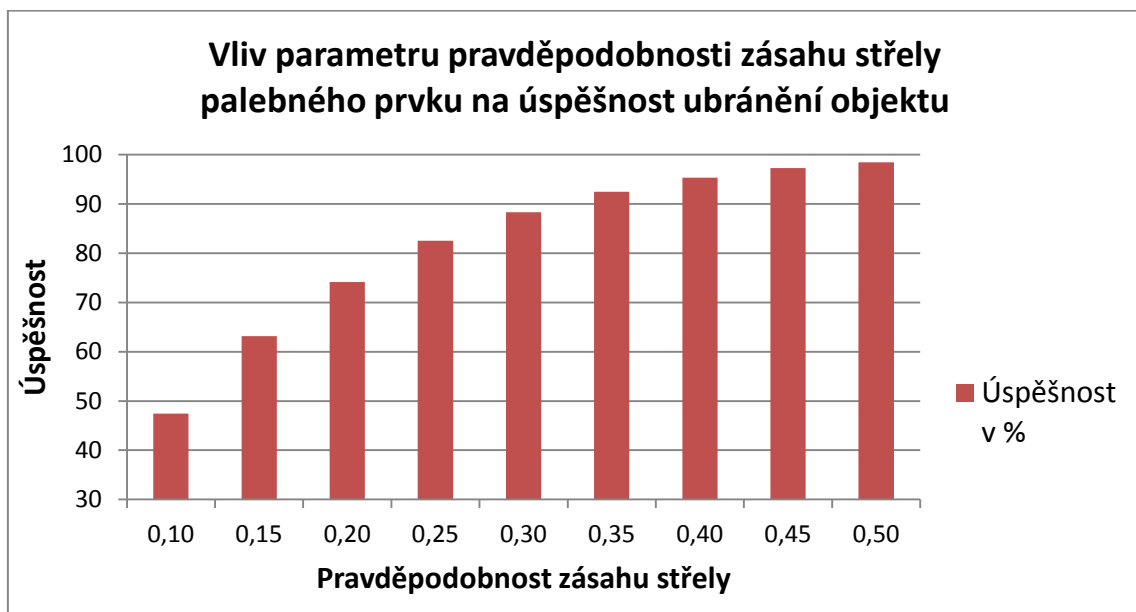
Parametr rychlosti střely je testován pouze pro hodnoty 300 a 4000 m/s. Předpokladem experimentu je, že rychlost rakety v tomto scénáři neovlivní úspěšnost. Tento parametr by měl ovlivňovat úspěšnost při 3. zvoleném algoritmu postřelování popsaného v kapitole 6.5.5 a dostatečně nízké hodnotě doby mezi výstřely. Výsledky experimentu jsou zobrazeny v tabulce 11.

Rychlost střely [m/s]	Úspěšnost v %	Max. vystřelených raket
300	63	6
4000	63,13	6

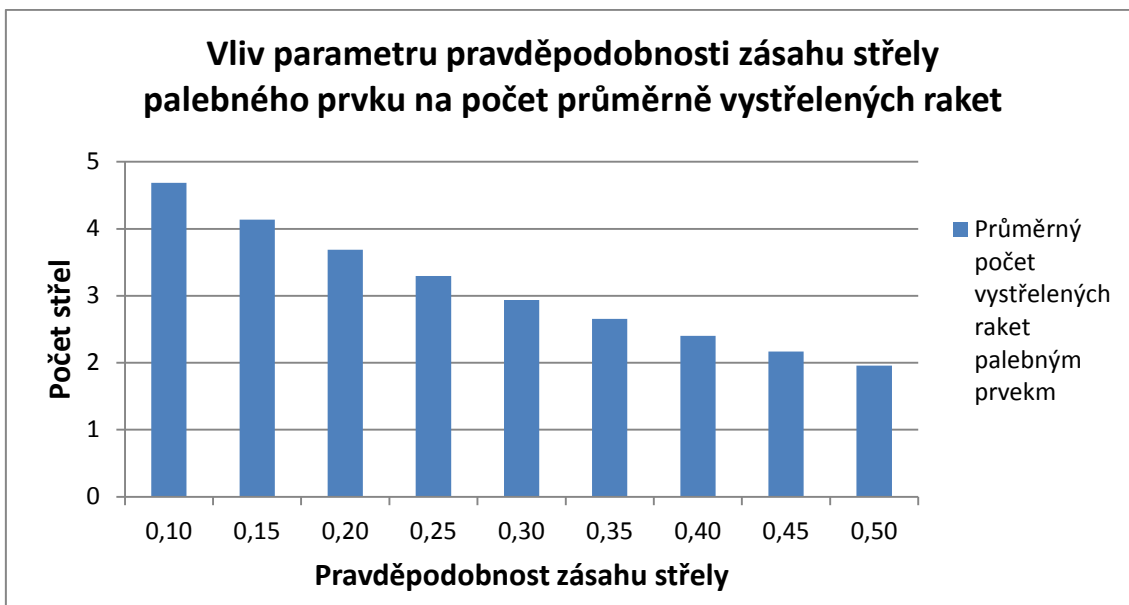
Tabulka 11: Výsledky vlivu rychlosti letu rakety palebného prvku [vlastní zpracování]

7.2.6 Vliv parametru pravděpodobnosti zásahu střely palebného prvku

Parametr pravděpodobnosti zásahu střely je testován pro rozmezí hodnot 0,05 až 0,5. Předpokladem je, že s rostoucí pravděpodobností zásahu, se bude zvyšovat úspěšnost. Výsledek experimentu je zachycen v grafu 9, kde lze pozorovat zvyšování úspěšnosti pro větší pravděpodobnosti zásahu, je zde i patrné že rozdíly úspěšností sousedících pravděpodobností, se postupně snižují. V grafu 10 je pak znázorněné, že vlivem zvýšené pravděpodobnosti zásahu, se snižuje průměrný počet vystřelených raket.



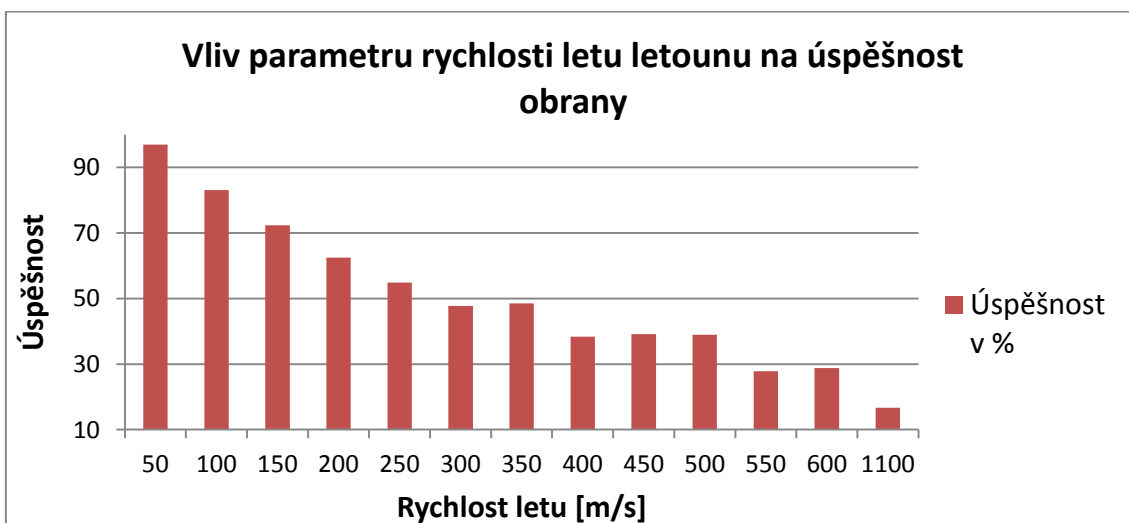
Graf 9: Úspěšnost jednotlivých hodnot pravděpodobností zásahu palebného prvku [vlastní zpracování]



Graf 10: Průměrný počet vystřelených raket palebného prvku jednotlivých hodnot pravděpodobností zásahu [vlastní zpracování]

7.2.7 Vliv parametru rychlosti letu letounu

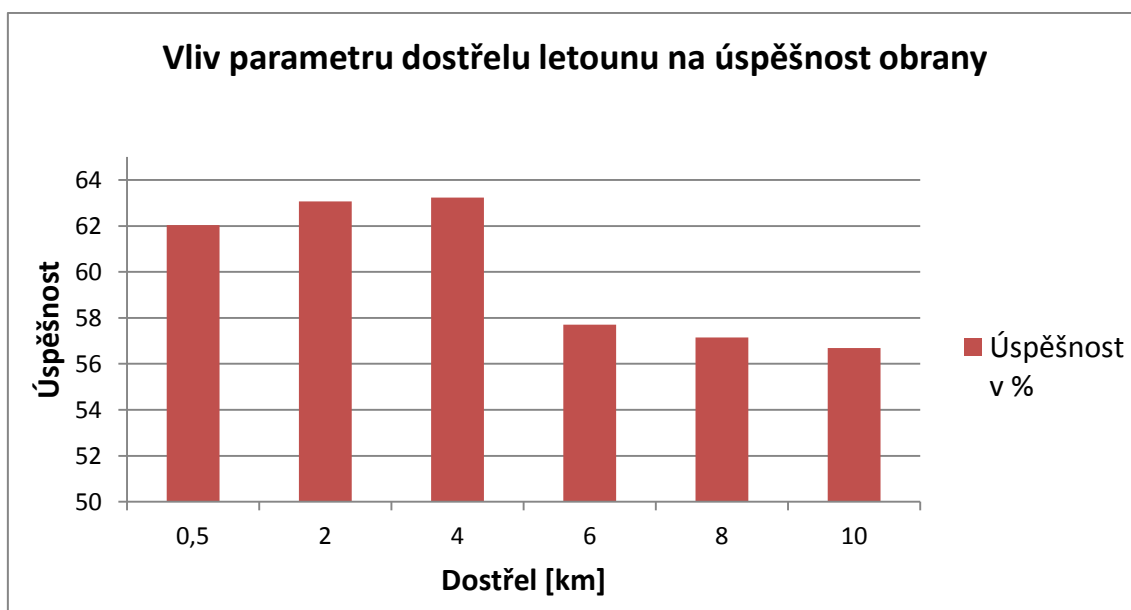
Parametr rychlosti letu letounu je testován pro hodnoty v rozsahu 50 až 1100 m/s. Předpokladem experimentu je, že s rostoucí rychlostí bude klesat úspěšnost ubránění. Výsledky experimentu jsou zachyceny v grafu 11, kde lze pozorovat klesání úspěšnosti. Pro některé sousední hodnoty rychlosti letu se úspěšnost drží na podobných hodnotách, což značí, že v simulaci byl vystřelen podobný průměrný počet raket bráněnými prvky a zvýšení rychlosti letu zde tedy nepřineslo letounu žádný užitek.



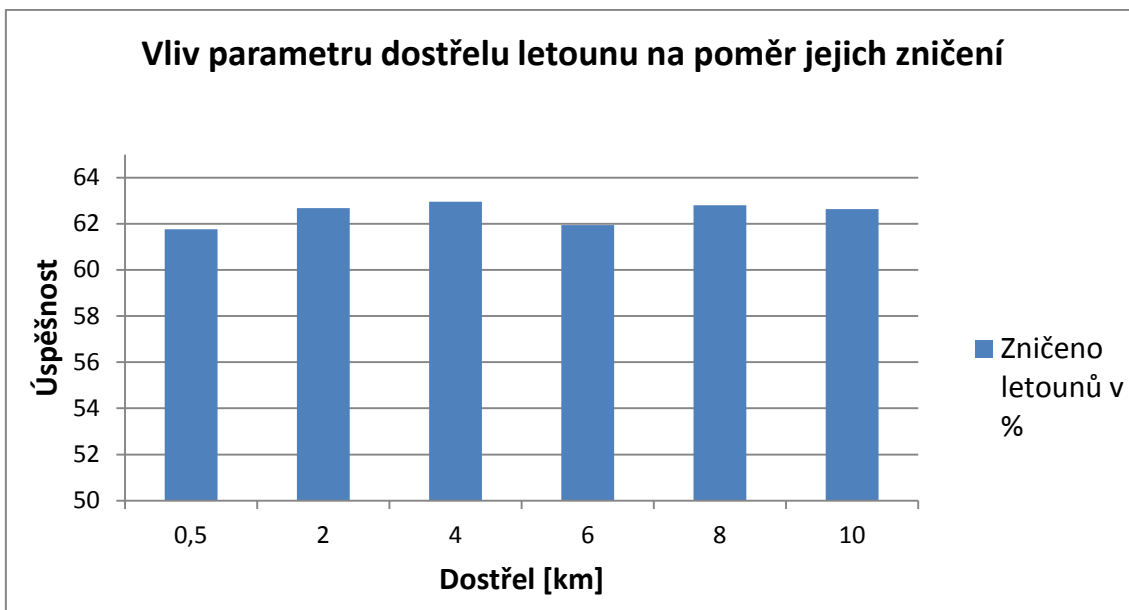
Graf 11: Úspěšnost jednotlivých hodnot rychlostí letu letounu [vlastní zpracování]

7.2.8 Vliv parametru dostřelu letounu

Parametr dostřelu letounu je testován pro hodnoty v rozmezí 0,5 až 10 km. Předpokladem experimentu je, že s rostoucím dostřelem se bude snižovat úspěšnost obrany. Výsledky experimentu jsou zachyceny v grafu 12, kde lze sledovat, snížení úspěšnosti až od hodnoty dostřelu 6 km. Dále jsou v grafu 13 uvedeny poměry počtu zničených letounů, kde lze vidět, že i přes sníženou úspěšnost je počet zničených letounů stále přibližně stejný. To značí situaci, kdy letoun stihl díky zvýšenému dostřelu vystřelit dříve, než byl sám zničen.



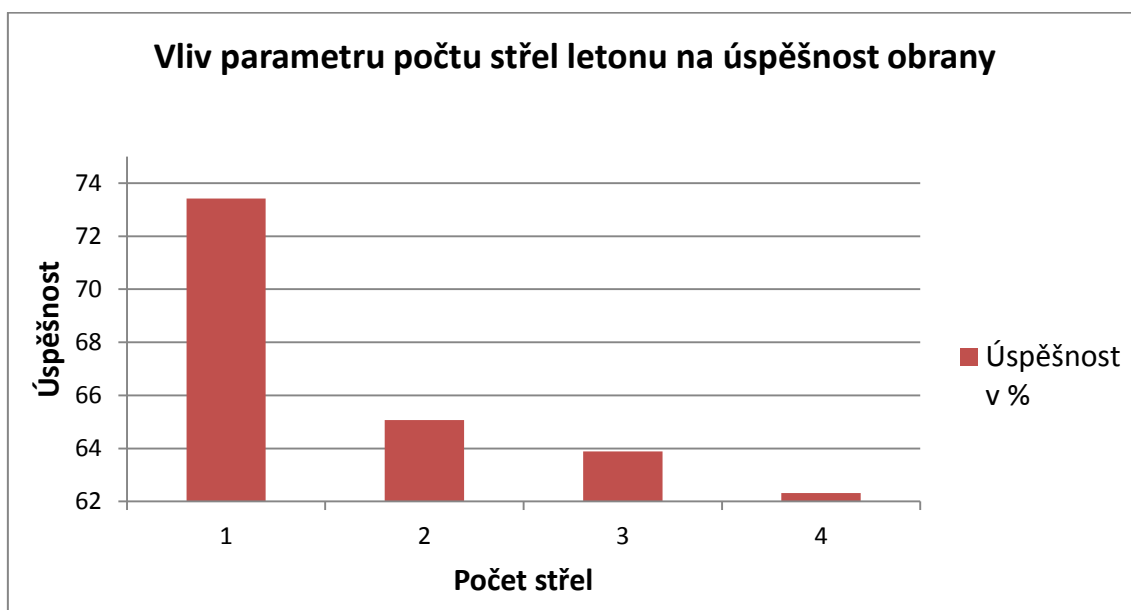
Graf 12: Úspěšnost jednotlivých hodnot dostřelu letounu [vlastní zpracování]



Graf 13: Poměr zničených letounů pro jednotlivé hodnoty dostřelu [vlastní zpracování]

7.2.9 Vliv parametru počtu střel letounu

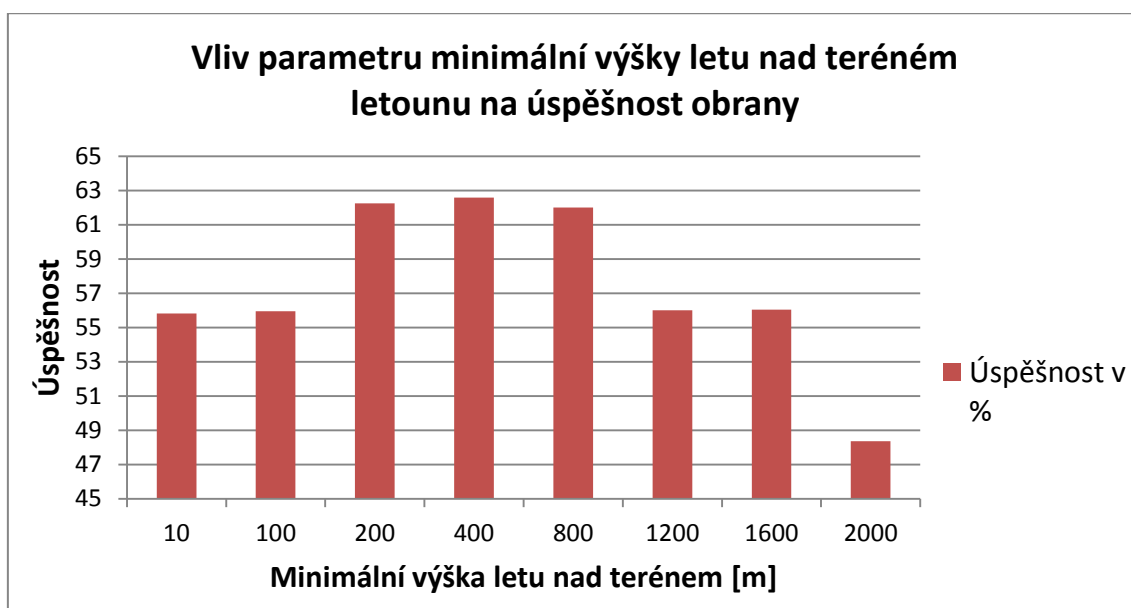
Parametr počtu střel letounu je testován pro hodnoty v rozsahu 1 až 4. Předpokladem experimentu je, že s rostoucím počtem střel se bude snižovat úspěšnost ubránění. Výsledky experimentu jsou zobrazeny v grafu 14, kde lze pozorovat postupné snižování úspěšnosti obrany. Největší rozdíl úspěšnosti je mezi jednou a dvěma střelami.



Graf 14: Úspěšnost jednotlivých hodnot počtu střel letounu [vlastní zpracování]

7.2.10 Vliv parametru minimální výšky letu letounu nad terénem

Parametr minimální výšky letu letounu nad terénem je testován v rozmezí 10 až 2000 metrů nad terénem. Předpokladem experimentu je, že příliš nízké výšky mohou způsobit nižší úspěšnost obrany z důvodů schování letounu za terénem. Dále při příliš vysokých výškách může dojít k tomu, že palebný prvek na letoun nedostřelí a tím je opět úspěšnost snížena. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 15, kde lze sledovat, že pro hodnoty výšky letu 10 a 100 metrů, jsou úspěšnosti ubránění nižší, než následující 3 hodnoty. Dále lze pozorovat, že od hodnoty 1200m se úspěšnost začne snižovat, kdy hodnotu 2000 metru je úspěšnost nejnižší.



Graf 15: Úspěšnost jednotlivých hodnot minimálních výšek letu [vlastní zpracování]

7.2.11 Vliv parametru rychlosti letu střely letounu

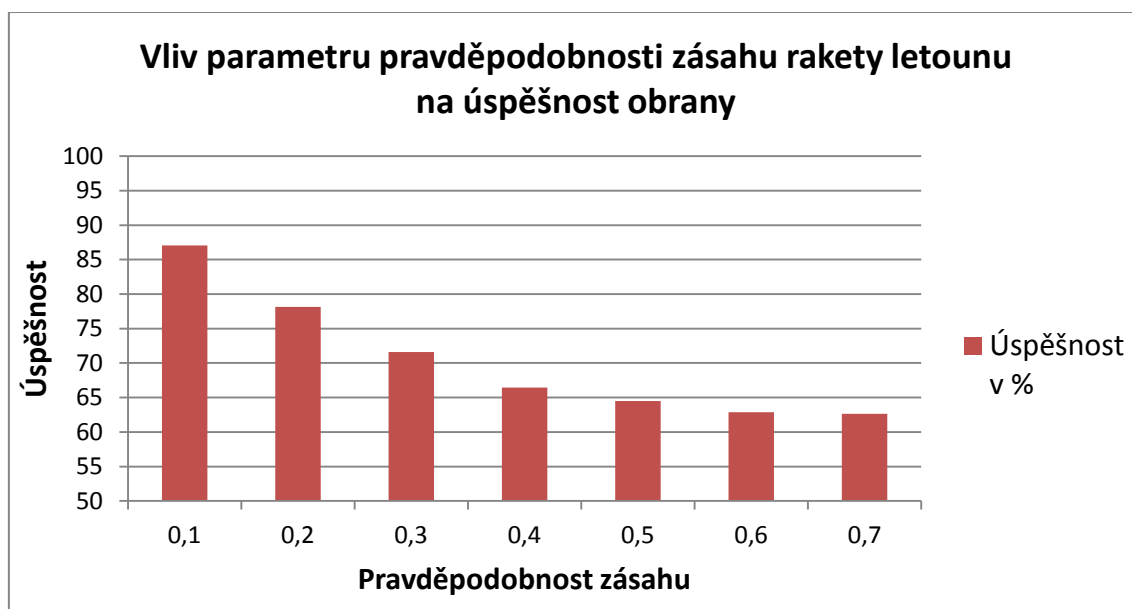
Parametr rychlosti střely letounu je testován pouze pro hodnoty 300 a 4000 m/s. Předpokladem experimentu je, že rychlost rakety v tomto scénáři neovlivní úspěšnost. Tento parametr by měl ovlivňovat úspěšnost při složitějších náletech, zahrnujících více letounů a bráněných objektů, kdy včasným zničením (raketa doletí k cíli rychle), ušetří letoun munici jinému letounu, který nestihne na stejný bráněný objekt vystřelit a může tuto munici použít na jiný cíl. Z výsledků zobrazených v tabulce 12, lze vidět, že rychlost střely pro tento scénář nemá žádný vliv.

Rychlost střely [m/s]	Úspěšnost v %
300	62,55
4000	62,54

Tabulka 12: Výsledky vlivu rychlosti letu rakety palebného prvku [vlastní zpracování]

7.2.12 Vliv parametru pravděpodobnosti zásahu střely letounu

Parametr pravděpodobnosti zásahu střely letounu je testován v rozmezí hodnot 0,1 až 0,7. Předpokladem experimentu je, že s rostoucí pravděpodobností zásahu bude klesat úspěšnost obrany. V grafu 16 prezentujícím výsledky experimentu je předpoklad potvrzen. Lze pozorovat i postupný pokles rozdílů úspěšnosti mezi jednotlivými hodnotami pravděpodobností.



Graf 16: Úspěšnost jednotlivých hodnot pravděpodobností zásahu střely letounu [vlastní zpracování]

8 Diskuse

Vytvořený model umožňuje zkoumat možnosti rozmístění palebných prvků v prostředí a jejich vliv na výsledek náletu. Lze měnit vlastnosti jednotlivých agentů (letoun, obranný palebný prvek a jejich střely), případně mít v prostředí umístěno více kategorií stejného typu agenta. Je umožněno běh simulace vizualizovat, ale také provádět sérii simulací v experimentu bez vizualizace za účelem sběru dat a jejich analýzy. Model byl vytvořen na základě konzultací s odborníky z oboru protivzdušné obrany.

Vytváření modelu je proces, ve kterém jsou využité koncepty a teorie neustále testovány a případně upřesňovány nebo zdokonalovány. Někdy je potřeba z výpočetních důvodů naopak některé principy zjednodušit, ale z hlediska neustálého vývoje jsou možnosti stále větší. Model vzniklý v rámci této DP se může také dále rozvíjet, kdy může být simulována například věrnější charakteristika střel, jejichž rychlost nebude mít v čase lineární průběh. Dále mohou být rozšířeny možnosti náletů, kdy v náletu mohou být přítomny letouny, které se snaží eliminovat palebné prvky.

V návaznosti se počítá s vytvořením modelu kombinující poznatky získané z modelu této DP s modelem obsahujícím prvky detekující letouny náletu. Mezi těmito prvky může být simulována přímá spolupráce a komunikace, případně může být vytvořeno centrální velení, které bude zprostředkovávat komunikaci mezi těmito jednotlivými prvky.

9 Závěr

Cílem práce bylo vytvořit multiagentní model, který umožní analyzovat postavení palebných prvků. Cíl práce byl splněn vytvořením modelu simulující nálet letounů na bráněný objekt v prostředí AnyLogic. Model by měl sloužit jako podpůrný plánovací nástroj určený odborníkům protivzdušné pozemní obrany.

V práci je popsáno paradigma agentového modelování s konkrétními ukázkami jeho praktického využití v oblasti vojenství. Dále jsou uvedeny vybrané nástroje pro tvorbu ABM, a jejich charakteristiky. Následuje popis nástroje AnyLogic, který byl vybrán jako implementační platforma. V závěru teoretické části jsou uvedeny numerické metody pro řešení nelineárních rovnic, které lze využít při výpočtu určení okamžiku střelby.

V praktické části je popsán navržený model a jeho agenti. K popisu modelu je využito také protokolu ODD+D. Vzniklý model byl testován sérií experimentů, které se zaměřovaly na vlivy vybraných parametrů na úspěšnost obrany bráněného objektu. Data získaná experimenty jsou součástí přílohy 2. Výsledky těchto experimentů jsou v práci interpretovány.

Model obsahuje značnou míru abstrakce a lze ho dále rozšiřovat. Předpokládá se jeho budoucí propojení s modelem obsahujícím průzkumné prvky, jejichž účel je detekovat letouny náletu.

10 Seznam použité literatury

- [1] OLŠEVIČOVÁ, K., 2015. Znalostní technologie 3: Soubor přednášek. *Fakulta informatiky a managementu UHK*.
- [2] OLŠEVIČOVÁ, K., 2015. Znalostní technologie 4: Soubor přednášek. *Fakulta informatiky a managementu UHK*.
- [3] SIEBERS, P.-O., AICKELIN, U., 2008. Introduction to multi-agent simulation. *arXiv preprint arXiv:0803.3905*.
- [4] NIGEL, G., 2008. Agent-based models. *Quantitative applications in the social sciences, no. 07-153. Sage Publications*. ISBN 978-1-4129-4964-4.
- [5] BONABEAU, E., 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 99, 7280–7287*.
- [6] MELLOULI, S., MOULIN, B., MINEAU, G., 2003. Laying down the foundations of an agent modelling methodology for fault-tolerant multi-agent systems, in: ESAW. *Springer*, pp. 275–293.
- [7] CASTI, J.L., 1997. Would-be worlds: how simulation is changing the frontiers of science. *John Wiley & Sons*. ISBN 978-0-7881-9676-8.
- [8] MACAL, C.M. NORTH, M.J., 2005. Tutorial on agent-based modeling and simulation, in: Proceedings of the 37th Conference on Winter Simulation. Winter Simulation Conference, pp. 2–15.
- [9] HUSÁKOVÁ, M., 2014. Agentově orientované modelování a simulace: Znalostní technologie III materiál pro podporu studia [online]. *Fakulta informatiky a managementu UHK*. [cit. 13. 8. 2016]. Dostupné z: URL: http://lide.uhk.cz/fim/ucitel/fshusam2/lekarnicky/zt3/zt3_dokumenty/AgentModelSimul.pdf
- [10] CEDERMAN, L.-E., 1997. Emergent actors in world politics: how states and nations develop and dissolve, Princeton studies in complexity. *Princeton University Press, Princeton, N.J.* ISBN 978-0-691-02149-2 978-0-691-02148-5.
- [11] CIOPPA, T.M., LUCAS, T.W., SANCHEZ, S.M., 2004. Military Applications of Agent-based Simulations, in: Proceedings of the 36th Conference on Winter Simulation, WSC '04. Winter Simulation Conference, Washington, D.C., pp. 171–180. ISBN 0-7803-8786-4.
- [12] CIMR, D., 2016. Agentová simulace efektivního rozmístění aktivních prvků protivzdušné obrany. *Fakulta informatiky a managementu UHK*.
- [13] MÜLLER, B., BOHN, F., DREBLER, G., GROENEVELD, J., KLASSERT, C., MARTIN, R., SCHLÜTER, M., SCHULZE, J., WEISE, H., SCHWARZ, N., 2013. Describing human decisions in agent-based models–ODD+ D, an

- extension of the ODD protocol [online]. *Environmental Modelling & Software*, vol. 48, [cit. 30. 3. 2017]. Dostupné z: URL: https://www.ufz.de/export/data/2/100069_ODD%20+%20D%20-%20Author%20manuscript.pdf
- [14] NIKOLAI, C., MADEY, G., 2009. Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms [online]. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 12, no. 2, [cit. 30. 3. 2017]. Dostupné z: URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>
- [15] AnyLogic: Multimethod Simulation Software [online]. *The AnyLogic Company*, St. Petersburg, 2016, [cit. 3. 11. 2016]. Dostupné z: URL: <http://www.anylogic.com>
- [16] The Repast Suite [online]. *Argonne National Laboratory*, 2017, [cit. 10. 8. 2017]. Dostupné z: URL: <https://repast.github.io/>
- [17] MASON Multiagent Simulation Toolkit [online]. [cit. 10. 8. 2017]. Dostupné z: URL: <https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>
- [18] AgentBuilder [online]. *Acronymics, Inc.*, 2016, [cit. 10. 8. 2017]. Dostupné z: URL: <http://www.agentbuilder.com/>
- [19] SimBioSys [online]. [cit. 10. 8. 2017]. Dostupné z: URL: <http://www.lucifer.com/~david/SimBioSys/>
- [20] Laboratory for simulation development [online]. [cit. 10. 8. 2017]. Dostupné z: URL: http://www.labsimdev.org/Joomla_1-3/
- [21] NetLogo [online]. *Uri Wilensky*, 2016, [cit. 10. 8. 2017]. Dostupné z: URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [22] MIT Scheller Teacher Education Program: StarLogo TNG [online]. [cit. 10. 8. 2017]. Dostupné z: URL: http://education.mit.edu/portfolio_page/starlogo-tng/
- [23] Run The Model: Military & Defence [online – webová stránka]. *AnyLogic North America LLC*, Massachusetts, 2016, [cit. 3. 11. 2016]. Dostupné z: URL: https://runthemodel.com/models/military_defence/
- [24] GAVALEC, M. Numerická a výpočetní matematika: 2. přednáška Numerické řešení rovnic. *Fakulta informatiky a managementu UHK*.

- [25] DUKA, M., 2010., Seminární práce: Řešení nelineárních rovnic numerickými metodami [online]. *Gymnázium Cheb*. [cit. 20. 7. 2017]. Dostupné z: URL: <http://absolventi.gymcheb.cz/2010/miduka/oktava/numerika.html>
- [26] RŮŽIČKOVÁ, I., HLAVIČKA, R., 2011. Numerické metody. *Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně*. [cit. 20. 7. 2017]. Dostupné z: URL: <http://physics.ujep.cz/~jskvor/NME/DalsiSkripta/Numerika.pdf>
- [27] MAHESHA M.G., 2012., Bisection Method [online – příspěvek blogu]. [cit. 28. 3. 2017]. Dostupné z: URL: <http://numericalcomputation.blogspot.cz/2012/04/bisection-method.html>
- [28] terrain.party [online – webová stránka]. [cit. 20. 7. 2017]. Dostupné z: URL: <http://terrain.party/>
- [29] Extensible 3D (X3D), ISO/IEC 19775-1:2008, 13 Geometry3D component [online – webová stránka]. Web3D Consortium: Open Standards for Real-Time 3D Communication. *Web3D Consortium, 2008*, [cit. 20. 7. 2017]. Dostupné z: URL: <http://www.web3d.org/documents/specifications/19775-1/V3.2/Part01/components/geometry3D.html>
- [30] 2K12 Kub mobile surface-to-air missile system 3d model [online – webová stránka]. 3D CadNav. *CadNav.com*. [cit. 20. 7. 2017]. Dostupné z: URL: <http://www.cadnav.com/3d-models/model-36008.html>
- [31] Seixas, R., Mediano, M., Gattass, M., 1999. Efficient line-of-sight algorithms for real terrain data. *III Simpósio de Pesquisa Operacional e IV Simpósio de Logística da Marinha–SPOLM 1999*.
- [32] Predictive firing (in a tile-based game) [online – příspěvek v diskuzi]. Game Development Stack Exchange. *Stack Exchange Inc., 2015*, [cit. 28. 3. 2017]. Dostupné z: URL: <http://gamedev.stackexchange.com/questions/35940/predictive-firing-in-a-tile-based-game>

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Agent a jeho vlastnosti, upraveno podle [8, 9].....	5
Obrázek 2: Znázornění změn mezi protokoly ODD a ODD+D, upraveno podle [13]	10
Obrázek 3: Princip iterační metody půlení intervalu, upraveno podle [27].....	15
Obrázek 4: Princip iterační metody regula falsi, upraveno podle [25].....	16
Obrázek 5: Nekonvergující průběh iterační metody sečen, upraveno podle [25]....	17
Obrázek 6: Princip iterační metody sečen, upraveno podle [25].....	17
Obrázek 7: Nekonvergující průběh Newtonovy metody, upraveno podle [25]	18
Obrázek 8: Princip Newtonovy metody, upraveno podle [25]	19
Obrázek 9: Uživatelské rozhraní modelu [vlastní zpracování].....	34
Obrázek 10: Detail ovládacích prvků uživatelského rozhraní [vlastní zpracování]	35
Obrázek 11: Schéma uzlu ElevationGrid [29]	37
Obrázek 12: Neupravená trajektorie nad terénem [vlastní zpracování]	39
Obrázek 13: Upravená trajektorie nad terénem [vlastní zpracování]	39
Obrázek 14: Znázornění vlivu terénu na schopnost postřelování [vlastní zpracování].....	40
Obrázek 15: Znázornění funkce a klíčových prvků využívající princip přímé viditelnosti [vlastní zpracování]	41
Obrázek 16: Analytické znázornění postřelování letícího letounu [vlastní zpracování].....	43
Obrázek 17: Zadání oblasti experimentu a jeho výsledná pozice [vlastní zpracování]	46
Obrázek 18: Vizualizace nejúspěšnější pozice [vlastní zpracování]	47
Obrázek 19: Vizualizace nejméně úspěšné pozice [vlastní zpracování]	48

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Příklady využití ABM, upraveno podle [8, 9].....	6
Tabulka 2: Ukázka vybraných ABM nástrojů a jejich domén, upraveno podle [14]	11
Tabulka 3: Popis modele podle ODD+D [vlastní zpracování].....	32
Tabulka 4: Popis přepínačů uživatelského rozhraní [vlastní zpracování]	32
Tabulka 5: Popis zaškrťávacích polí uživatelského rozhraní [vlastní zpracování] ..	33
Tabulka 6: Popis tlačítek uživatelského rozhraní [vlastní zpracování].....	34
Tabulka 7: Vstupy experimentu pro určení výchozí pozice palebného prvku [vlastní zpracování]	45
Tabulka 8: Výchozí hodnoty parametrů experimentů zkoumající vlivy jednotlivých parametrů palebného prvku [vlastní zpracování].....	48
Tabulka 9: Jednotlivé hodnoty testovaných parametrů palebného prvku [vlastní zpracování]	49
Tabulka 10: Jednotlivé hodnoty testovaných parametrů letounu [vlastní zpracování]	49
Tabulka 11: Výsledky vlivu rychlosti letu rakety palebného prvku [vlastní zpracování]	54
Tabulka 12: Výsledky vlivu rychlosti letu rakety palebného prvku [vlastní zpracování]	59
Tabulka 14: Prvky agenta typu letoun (Aircraft) [vlastní zpracování].....	70
Tabulka 15: Prvky agenta typu obranný palebný prvek (Defence) [vlastní zpracování].....	72
Tabulka 16: Prvky agenta typu střela (Missile) [vlastní zpracování].....	72
Tabulka 17: Prvky agenta typu bráněný objekt (ProtectedObject) [vlastní zpracování].....	73
Tabulka 18: Prvky agenta typu main [vlastní zpracování].....	77

13 Seznam grafů

Graf 1: Úspěšnost ubránění jednotlivých pozic palebného prvku [vlastní zpracování]	47
Graf 2: Úspěšnost jednotlivých poloměrů dostřelu palebného prvku [vlastní zpracování]	50
Graf 3: Maximální počet vystřelených střel palebného prvku jednotlivých poloměrů dostřelu [vlastní zpracování]	50
Graf 4: Úspěšnost jednotlivých časů mezi výstřely palebného prvku [vlastní zpracování]	51
Graf 5: Maximální počet vystřelených raket palebného prvku jednotlivých hodnot časů mezi výstřely [vlastní zpracování]	51
Graf 6: Úspěšnost jednotlivých hodnot počtu střel palebného prvku [vlastní zpracování]	52
Graf 7: Úspěšnost jednotlivých výšek bodu výstřelu palebného prvku [vlastní zpracování]	53
Graf 8: Maximální počet vystřelených raket jednotlivých hodnot výšek bodu výstřelu palebného prvku [vlastní zpracování]	53
Graf 9: Úspěšnost jednotlivých hodnot pravděpodobností zásahu palebného prvku [vlastní zpracování]	54
Graf 10: Průměrný počet vystřelených raket palebného prvku jednotlivých hodnot pravděpodobností zásahu [vlastní zpracování]	55
Graf 11: Úspěšnost jednotlivých hodnot rychlostí letu letounu [vlastní zpracování]	55
Graf 12: Úspěšnost jednotlivých hodnot dostřelu letounu [vlastní zpracování]	56
Graf 13: Poměr zničených letounů pro jednotlivé hodnoty dostřelu [vlastní zpracování]	57
Graf 14: Úspěšnost jednotlivých hodnot počtu střel letounu [vlastní zpracování]	57
Graf 15: Úspěšnost jednotlivých hodnot minimálních výšek letu [vlastní zpracování]	58
Graf 16: Úspěšnost jednotlivých hodnot pravděpodobností zásahu střely letounu [vlastní zpracování]	59

14 Přílohy

Příloha 1: Tabulky parametrů a proměnných agentů	69
Příloha 2: 1 ks DVD.....	77

Příloha 1: Tabulky parametrů a proměnných agentů

Letoun (Aircraft)		
Název prvku	Prvek	Popis
id	parametr - <i>int</i>	Unikátní celočíselný identifikátor odlišující jedince stejné kategorie. Rozsah je 0 až $n-1$, kde n je počet letounů dané kategorie.
category	parametr - <i>int</i>	Identifikátor určující do jaké kategorie letoun spadá, podle kategorie jsou určeny hodnoty následujících parametrů, kromě parametru <i>target</i> . Kategorie může nabývat hodnot 1 až 10.
speed	parametr - <i>double</i>	Určuje rychlost pohybu. V grafickém uživatelském rozhraní (dále GUI) lze nastavit v rozsahu 50 až 1500 m/s.
fireDistance	parametr - <i>double</i>	Určuje maximální vzdálenost v prostoru, kdy je letoun schopný postřelovat. V GUI Nabývá hodnot v rozsahu 1 až 10km.
reloadTime	parametr - <i>double</i>	Udává čas potřebný pro nabití mezi 2 výstřely. V GUI nabývá hodnot v rozsahu 0,1 až 10 sekund.
ammo	parametr - <i>int</i>	Údaj určující počet střel, které je možno po dobu simulace vystřelit. Letoun může nést 1 až 10 střel.
missileSpeed	parametr - <i>double</i>	Určuje rychlost pohybu střely, které letoun vypouští. V grafickém uživatelském rozhraní (dále GUI) lze nastavit v rozsahu 300 až 4000 m/s.
missileHitP	parametr - <i>double</i>	Určuje pravděpodobnost vypuštěné rakety na zásah cíle. Rozsah parametru je 0 až 1.
target	parametr - <i>ProtectedObject</i>	Údaj určující cíl, na který letou nalétává. Ve výchozím nastavení se volí nejbližší cíl.
initX	parametr - <i>double</i>	Údaj uchovávaný počáteční umístění letounu na souřadnici X.
initY	parametr - <i>double</i>	Údaj uchovávaný počáteční umístění letounu na souřadnici Y.
initZ	parametr - <i>double</i>	Údaj uchovávaný počáteční umístění letounu na souřadnici Z.

isDestroyed	proměnná - <i>boolean</i>	Pomocná proměnná určující stav letounu, jestli je nebo není zničený. V případě zničení přestane letoun vykonávat pohyb, nemůže postřelovat a je ignorován obrannými palebnými prvky. V modelu je zničený letoun též odlišen tmavou barvou.
timeToReachTarget	proměnná - <i>double</i>	Pomocná proměnná udávající čas, za který letoun dorazí do cíle. Tento údaj je využit k určení priority, pokud palebný prvek může postřelovat více letounů.
rocketsAimedNumber	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná udávající počet střel, které směřují k letounu. Tento údaj je využit k určení priority, pokud palebný prvek může postřelovat více letounů.
distanceToTarget	proměnná - <i>double</i>	Pomocná proměnná udávající vzdálenost k cíli. Je využita k určení zbývajících času letu.
quadrant	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná udávající, ve kterém směru letoun letí. Využito pro zjištění, jestli letoun přeletěl bráněný objekt.
isInFront	proměnná - <i>boolean</i>	Pomocná proměnná udávající, jestli letoun přeletěl bráněný objekt.
path	proměnná - <i>Path</i>	Pomocná proměnná udržující referenci na trajektorii letounu.
network	proměnná - <i>Network</i>	Pomocná proměnná uchováající referenci na síť trajektorie letounu.
tempT	proměnná - <i>double</i>	Pomocná proměnná využita při výpočtech postřelování letounů.
calcTimeToReachTarget	opakovaná událost	Událost aktualizující hodnotu zbývajících času letu letounu k cíli.

Tabulka 13: Prvky agenta typu letoun (Aircraft) [vlastní zpracování]

Obranný palebný prvok (Defence)		
Název prvku	Prvek	Popis
id	parametr - <i>int</i>	Unikátní celočíselný identifikátor odlišující jedince stejné kategorie. Rozsah je 0 až $n-1$, kde n je počet obranných prvků dané kategorie.
category	parametr - <i>int</i>	Identifikátor určující do jaké kategorie obranný prvok spadá, podle kategorie jsou určeny hodnoty následujících parametrů. Kategorie může nabývat hodnot 1 až 10.
fireRadius	parametr - <i>double</i>	Určuje maximální dostřel palebného prvku v prostoru. V GUI Nabývá hodnot v rozsahu 0,5 až 50km.
reloadTime	parametr - <i>double</i>	Udává čas potřebný pro nabití mezi 2 výstřely. V GUI nabývá hodnot v rozsahu 0,1 až 10 sekund.
ammo	parametr - <i>int</i>	Údaj určující počet střel, které je možno po dobu simulace vystřelit. Lze zadat 0 až 1000 střel.
firePointHeight	parametr - <i>double</i>	Výška bodu výstřelu rakety nad terénem. V GUI lze zadat v rozsahu 0 až 20 metrů.
missileSpeed	parametr - <i>double</i>	Určuje rychlost pohybu střely, které obranný prvok vypouští. V GUI lze nastavit v rozsahu 300 až 4000 m/s.
missileHitP	parametr - <i>double</i>	Určuje pravděpodobnost vypuštěné rakety na zásah cíle. Rozsah parametru je 0 až 1.
algorithm	parametr - <i>int</i>	Údaj určující použitý algoritmus pro určení postřelování letounu. V modelu jsou definovány 3 algoritmy prezentovány čísla 0, 1 a 2 viz kapitola 6.5.5.
initX	parametr - <i>double</i>	Údaj uchovávající počáteční umístění palebného prvku na souřadnici X.
initY	parametr - <i>double</i>	Údaj uchovávající počáteční umístění palebného prvku na souřadnici Y.
initZ	parametr - <i>double</i>	Údaj uchovávající počáteční umístění palebného prvku na souřadnici Z.
missileZ	proměnná - <i>double</i>	Proměnná udávající absolutní výšku bodu výstřelu rakety v jednotkách zobrazení modelu.

canFire	proměnná - <i>boolean</i>	Proměnná určující, jestli může obranný prvek vystřelit. Při nabíjení je hodnota false.
tMax	proměnná - <i>double</i>	Proměnná určující čas, za který doletí raketa na hranici dostřelu. Hodnota je udána v sekundách.
target	proměnná - <i>Aircraft</i>	Proměnná udávající letoun postřelovaný palebným prvkem. Tato hodnota je určena v závislosti na vybraném algoritmu určení cíle.
targetAc	proměnná - <i>Aircraft</i>	Pomocná proměnná užitá při určování letounu, který má být postřelován.
possibleTargets	proměnná - <i>ArrayList<Aircraft></i>	Kolekce letadel v dostřelu. Uchování těchto hodnot slouží pro vypisování změn stavů palebného prvku.
fireHandler	opakovaná událost	Událost, při které jsou určeny letouny v dostřelu, a podle algoritmu je vybrán cíl postřelování. Dále je zjištěno, jestli lze letoun postřelovat, nebo jestli je letoun schovaný za terénem. Nakonec je při splnění všech podmínek vytvořena raketa směřující k cílovému letounu.

Tabulka 14: Prvky agenta typu obranný palebný prvek (Defence) [vlastní zpracování]

Střela (Missile)		
Název prvku	Prvek	Popis
id	parametr - <i>int</i>	Unikátní celočíselný identifikátor odlišující jedince.
speed	parametr - <i>double</i>	Určuje rychlost pohybu střely. V grafickém uživatelském rozhraní lze nastavit v rozsahu 300 až 4000 m/s.
hitChance	parametr - <i>double</i>	Určuje pravděpodobnost vypuštěné rakety na zásah cíle. Rozsah parametru je 0 až 1.
target	parametr - <i>Agent</i>	Určuje konkrétního agenta, který raketu vystřelil. Agent může být typu letoun nebo obranný palebný prvek.
source	parametr - <i>Agent</i>	Určuje konkrétního agenta, na kterého raketa směřuje. Agent může být typu letoun nebo obranný palebný prvek.
missileLifeCycle	opakovaná událost	Událost, při které se zjišťuje, jestli raketa dosáhla cíle. V případě že ano, je určeno podle pravděpodobnosti, jestli cíl zasáhla.

Tabulka 15: Prvky agenta typu střela (Missile) [vlastní zpracování]

Bráněný objekt (ProtectedObject)		
Název prvku	Prvek	Popis
id	parametr - <i>int</i>	Unikátní celočíselný identifikátor odlišující jedince. Rozsah je 0 až $n-1$, kde n je celkový počet bráněných objektů.
isDestroyed	proměnná - <i>boolean</i>	Pomocná proměnná určující stav bráněného objektu, jestli je nebo není zničený. V případě zničení je ignorován letouny. V modelu je zničený bráněný objekt odlišen tmavou barvou.

Tabulka 16: Prvky agenta typu bráněný objekt (ProtectedObject) [vlastní zpracování]

Main		
Název prvku	Prvek	Popis
aircrafts	populace agentů typu Aircraft - <i>ArrayList</i>	Obsahuje referenci na všechny agenty typu letoun.
defense	populace agentů typu Defence - <i>ArrayList</i>	Obsahuje referenci na všechny agenty typu obranný palebný prvek.
missiles	populace agentů typu Missile - <i>LinkedHashSet</i>	Obsahuje referenci na všechny agenty typu střela.
protectedObjects	populace agentů typu ProtectedObject - <i>ArrayList</i>	Obsahuje referenci na všechny agenty typu bráněný objekt.
acAmmo	parametr - <i>int []</i>	Určuje počet nábojů všech 10 kategorií letounů.
acFireDist	parametr - <i>double []</i>	Určuje vzdálenost dostřelu všech 10 kategorií letounů v kilometrech.
acH	parametr - <i>double []</i>	Určuje výšku všech 10 kategorií letounů nad terénem v metrech.
acV	parametr - <i>double []</i>	Určuje rychlost letu letounů všech 10 kategorií v metrech za sekundu.
acReload	parametr - <i>double []</i>	Určuje dobu nabíjení mezi 2 výstřely letounů všech 10 kategorií v sekundách.
acPos	parametr - <i>double [][][]</i>	Určuje počáteční souřadnice x, y všech letounů všech kategorií.
acTargets	parametr - <i>String [] []</i>	Určuje první cílový bráněný objekt, na který letoun nalétává. Lze určit i možnost náletu na nejbližší bráněný objekt, která je vybrána jako výchozí.
acMisV	parametr - <i>double []</i>	Určuje rychlost letu střel letounů všech kategorií. Rychlost je udávána v metrech za sekundu.

acMisHitP	parametr - <i>double</i> []	Určuje pravděpodobnost zásahu rakety letounů všech kategorií. Rozsah jednotlivých pravděpodobností je 0 až 1.
defAlgorithm	parametr - <i>int</i> []	Určuje algoritmus pro výběr letounu k sestřelení pro každou kategorii obranných palebných prvků. Algoritmus je určen čísly 0,1 a 2.
defAmmo	parametr - <i>int</i> []	Určuje počet nábojů všech kategorií obranných palebných prvků.
defRadius	parametr - <i>double</i> []	Určuje maximální dostřel všech kategorií obranných palebných prvků v kilometrech.
defReload	parametr - <i>double</i> []	Určuje dobu nabíjení mezi 2 výstřely všech kategorií obranných palebných prvků v sekundách.
defPH	parametr - <i>double</i> []	Určuje výšku bodu výstřelu střely nad terénem pro všechny kategorie obranných prvků v metrech.
defMisV	parametr - <i>double</i> []	Určuje rychlost letu střel obranných prvků všech kategorií. Rychlost je udávána v metrech za sekundu.
defMisHitP	parametr - <i>double</i> []	Určuje pravděpodobnost zásahu rakety obranných prvků všech kategorií. Rozsah jednotlivých pravděpodobností je 0 až 1.
defPos	parametr - <i>double</i> [][][]	Určuje počáteční souřadnice x, y všech palebných obranných prvků všech kategorií.
defNum	parametr - <i>int</i> []	Při experimentu určuje počet aktivních prvků.
poPos	parametr - <i>double</i> [][]	Určuje počáteční souřadnice x, y všech bráněných objektů.
alignment	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, jestli jsou souřadnice x, y všech agentů posunuty na souřadnice nejbližšího výškového bodu. Při určení výšky v inicializaci je pak využito vždy známé výšky a nedochází nikdy k interpolaci okolních hodnot.
curlter	parametr - <i>int</i>	Při experimentu určuje číslo současné iterace.

currentSetup	parametr - <i>int []</i>	Určuje postavení palebných prvků v probíhajícím experimentu. Jedná se konkrétně o indexy na pole s pozicemi obranných prvků všech kategorií.
heightData	parametr - <i>double [][]</i>	Určuje výšky bodů terénu v pravidelné výškové mřížce. Výšky jsou v jednotkách zobrazení modelu.
indexesToDefPos	parametr - <i>ArrayList</i>	Obsahuje postavení palebných prvků všech experimentů. Konkrétně obsahuje indexy na pole s pozicemi obranných prvků všech kategorií.
isExperiment	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, zdali je prováděn experiment, nebo jedno spuštění simulace
iterationCount	parametr - <i>int</i>	Využito při experimentech. Určuje počet iterací pro jednotlivé hodnoty parametrů.
logging	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, jestli se mají vypisovat údaje o simulaci a agentech.
setupNumber	parametr - <i>int</i>	Určuje index právě probíhajícího experimentu.
showAircraftTrajectory	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, jestli se mají vykreslovat trajektorie letounů.
showEstimatedTime	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, jestli se má zobrazovat odhadovaný čas doletu letounu nad bráněný objekt.
showFireRadius	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, jestli má být zobrazena oblast dostřelu obranných palebných prvků.
showImpactPosition	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, jestli má být vykresleno místo možného střetu letounu se střelou.
showLabel	parametr - <i>boolean</i>	Určuje, jestli mají být vypsány popisky jednotlivých entit.
terrain	parametr - <i>File</i>	Obsahuje referenci na x3d soubor obsahující terén simulace.
acAlive	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná udávající počet nezničených letounů. Výpočet se provádí na konci simulace.
acDestroyed	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná udávající počet zničených letounů. Výpočet se provádí na konci simulace.

indexScale	proměnná - <i>double</i>	Pomocná proměnná. Jedná se o poměr šířky obrázku výškové mapy s počtem výškových bodů na stranu čtvercové oblasti. Využívá se při určení výškového bodu na dané souřadnici x,y.
logsText	proměnná - <i>JTextPane</i>	Reference na komponentu vykreslující informace o simulaci a jejich entitách.
missileIdGenerator	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná navyšující se vytvořením každé rakety a určující její identifikátor.
notConvergentCounter	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná počítající případy, kdy nekonvergovala metoda sečen, určující moment střelby obranného palebného prvku.
outputStringDefPos	proměnná - <i>String</i>	Textový řetězec obsahující polohy aktivních palebných prvků probíhajícím experimentu.
panel	proměnná - <i>JScrollPane</i>	Kontejner obsahující text o simulaci a jejích entitách. Umožňuje posouvání zobrazení v případě delšího textu.
poAlive	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná udávající počet nezničených bráněných objektů. Výpočet se provádí na konci simulace.
poDestroyed	proměnná - <i>int</i>	Pomocná proměnná udávající počet zničených bráněných objektů. Výpočet se provádí na konci simulace.
terrainImage	proměnná - <i>File</i>	Obsahuje referenci na soubor obsahující obrázek výškové mapy.
terrainLength	proměnná - <i>double</i>	Pomocná proměnná udávající délku strany terénu v metrech.
terrainMax	proměnná - <i>double</i>	Pomocná proměnná udávající výšku největšího bodu v jednotkách zobrazení modelu.
terrainMin	proměnná - <i>double</i>	Pomocná proměnná udávající výšku nejnižšího bodu v jednotkách zobrazení modelu.
checkForExperimentEnd	jednorázová událost	Událost spuštěna ve druhé vteřině simulace, kontrolující počet iterací probíhajícího experimentu. Při překročení stanoveného počtu iterací, ukončí stávající iteraci. Událost je volena, protože při inicializaci nelze simulaci ukončit.

checkForSimulationEnd	opakovaná událost	Opakovaná událost, kontrolující ukončení simulace.
updateGraphicsElements	opakovaná událost	Opakovaná událost, aktualizující odhadovaný čas letu letounů nad bráněný objekt.

Tabulka 17: Prvky agenta typu main [vlastní zpracování]

Příloha 2: 1 ks DVD

Obsah přílohy:

- Vytvořený model analýzy rozmístěný palebných prvků. Pro správou funkčnost modelu je potřeba mít nainstalovaný AnyLogic verze 7.3.3.
- Výsledky a data experimentů provedených na modelu.

Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta

PŘEDKLÁDÁ:	ADRESA	OSOBNÍ ČÍSLO
Láska Lukáš	Jabkenice 165, Jabkenice	114761

TÉMA ČESKY:

Analýza postavení palebných prvků a simulace náletu na bojovou sestavu jednotky pozemní protivzdušné obrany

TÉMA ANGLICKY:

The position analysis of firing elements and simulation of air-raid on ground anti-air defence

VEDOUcí PRÁCE:

Ing. Richard Cimler - KIT

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je analýza postavení palebných prvků a simulace náletu na bojovou sestavu jednotky pozemní protivzdušné obrany

Osnova:

- 1) Úvod
- 2) Cíl práce
- 3) Agentové modelování
- 4) Problematika postřelování letounů
- 5) Návrh modelu
- 6) Implementace modelu
- 7) Experimenty
- 8) Závěr

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

NIKOLAI, C., MADEY, G., 2009. Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms [online]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 12, no. 2

CIOPPA, T.M., LUCAS, T.W., SANCHEZ, S.M., 2004. Military Applications of Agent-based Simulations, in: Proceedings of the 36th Conference on Winter Simulation, WSC '04. Winter Simulation Conference, Washington, D.C., pp. 171180. ISBN 0-7803-8786-4.

Grigoryev, Ilya. Anylogic 7 in Three Days: A Quick Course in Simulation Modeling. 2. ed. Middletown: Selbstverlag, 2015. ISBN 978-1508933748.

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum: