

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«Крымский федеральный университет имени В. И.
Вернадского»**
(ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»)
Таврическая академия (структурное подразделение)
Факультет математики и информатики
Кафедра прикладной математики

Консманов Алексей Витальевич

Использование мультиагентного подхода в военном деле

Курсовая работа

Обучающегося	<u>1</u> курса
Направления подготовки	<u>01.04.04. Прикладная математика</u>
Форма обучения	<u>очная</u>

Научный руководитель
доцент кафедры прикладной
математики, к. ф.-м. н.

Ю.Ю. Дюличева

Симферополь 2020

Оглавление

Введение	3
1 Мультиагентное моделирование системы поддержки принятия решений в составе системы противоракетной обороны	6
1.1 Описание системы ПРО	6
1.2 Агентное моделирование и понятие «агента»	7
1.3 Система обозначений и ограничений для алгоритма	15
2 Алгоритм роя частиц переменной окрестности с отрицательным отбором и его применение	17
2.1 Общая идея алгоритма	17
2.2 Реализация алгоритма и интеграция его в СПРО	22
2.3 Тестирование и сравнение результатов работы с аналогичными моделями	24
Заключение	27
Список литературы	29

Введение

Системы противоракетной обороны играют важную роль в обеспечении защиты государства от баллистических ракет и позволяют поддерживать стратегический паритет [1]. Математическое моделирование таких систем представляет собой сравнительную дешевую в терминах людских и материальных ресурсов и безопасную для окружающей среды и людей альтернативу проведению реальных испытаний [2]. Как правило, системы противоракетной обороны (далее ПРО) представляют собой комплексную систему, имеющую нелинейный характер и состоящую из множества подсистем реального времени, работающих параллельно. Необходимость точного описания порядка взаимодействия компонентов системы и характера этих взаимодействий и их результата является ключевым важным условием оценки эффективности всей системы ПРО.

Следует заметить, что многие современные системы являются многослойными, то есть содержат не просто отдельные компоненты, выполняющие действия на отдельном этапе, а целые подсистемы, выполняющие эти действия [3], [4].

Область данной работы не является принципиально новой и неисследованной и уже многие авторы внесли свой вклад в разработку построения максимально точных моделей, способных описать систему ПРО. Большинство работ, связанных с данной темой использует один из следующих подходов: традиционное детерминированное моделирование с использованием системы дифференциальных уравнений, инженерный подход к описанию системы, вычислительный эксперимент [4], [5], [6], [7]. Однако, упомянутые выше подходы имеют ряд недостатков и не могут описать внутреннюю сложность систем и связей между ними. В противоположность этим классическим методам, мультиагентное моделирование предоставляет подход к моделированию по принципу «сверху вниз», т.е. заменяет сложный подход описания всей системы с помощью одной системы уравнений описанием компонентов и связей между ними, что и формирует полное описание системы, что в свою очередь является более подходящим подходом при моделировании комплексных систем.

Этот интересный и новый метод не мог остаться незамеченным и уже рассмотрен в ряде работ [4], [5], [6], [7], [9]. Все эти работы нацелены

на решение задач управления, но не решают задачу автономного принятия решения. Решение задачи принятия решения в данных условиях особенно интересно, т.к. система ПРО представляет собой систему реального времени, и особенно важным ограничением является ограничение по времени на принятие решения – обычно, полный жизненный цикл баллистической ракеты составляет около 28 минут. Данное ограничение по времени накладывает условие на временную сложность алгоритма принятия решения – он должен завершиться и завершиться намного раньше, чем это временное ограничение, т.к. помимо принятия решения необходимо также провести пуск ракеты-перехватчика и дожидаться поражения или не поражения ей цели [10], [11], [12].

Таким образом, ожидается, что построение системы принятия решения улучшит характеристики моделируемой системы, равно как и оптимизация этой системы принятия решений еще более увеличит эффективность системы в целом [13]. Ли в своей работе [14] уже предложил использование модифицированного алгоритма метода роя частиц.

Целью данной работы является реализация алгоритма принятия решений для системы ПРО, предназначенной для перехвата межконтинентальных баллистических ракет, и тестирование этой системы на имитационном ПО. Для этого необходимо решить следующий комплекс задач:

- Описать систему противоракетной обороны для которой будет строиться модель;
- описать агентов;
- интегрировать описанных агентов в модель системы ПРО;
- описать систему принятия решений и накладываемые на нее ограничения;
- описать алгоритм принятия решений и провести его оптимизацию;
- провести тестирование полученного алгоритма в имитационном ПО;
- проанализировать результаты и сделать выводы.

Для решения поставленного комплекса задач использовались методы математической статистики и теории вероятности, дискретной ма-

тематики, математического анализа и теоретической механики. Разработанная модель основывается на методах агентного / мультиагентного моделирования.

Объект исследования: изучение алгоритмов оптимизации методом роя частиц.

Предмет исследования: построение и анализ модели ПРО, имеющей блок принятия решений, основанный на оптимизации методом роя частиц.

Практическая ценность работы: полученный алгоритм может быть использован как база для разработки более точных алгоритмов, специфичных для конкретных средств перехвата и их целей. Данный алгоритм способен имитировать перехват целей с заданными пространственно-скоростными ограничениями средствами с аналогичными ограничениями и описывает систему ПРО с фиксированным количеством компонентов.

В первой части данной работы рассматриваются системы принятия решения для системы ПРО; во второй анализируется предложенный алгоритм на основании метода роя частиц; в третьей части описана реализация предложенного алгоритма и оцениваются результаты его работы.

1 Мультиагентное моделирование системы поддержки принятия решений в составе системы противоракетной обороны

1.1 Описание системы ПРО

Как правило, процесс противоракетной обороны (далее ПРО) состоит из последовательности этапов, включающих раннее обнаружение, отслеживание, распознавание, принятие решения и непосредственный перехват цели, достигаемый посредством взаимодействия всех компонентов системы ПРО (далее СПРО) [11].

Не вдаваясь в технические подробности и устройство составных компонентов СПРО, отметим только сами компоненты и функции, выполняемые этими компонентами:

- Радар раннего обнаружения фиксирует факт запуска ракет и получает приблизительные данные о положении и скорости;
- отслеживающий радар «ведёт» ракету-перехватчик до завершения перехвата или промаха, получая инструкции из командного центра и передавая их ракете-перехватчику;
- командный центр выполняет роль коммуникационного звена и центра обработки информации; производит оценку траектории ракеты, на основании данных от радара раннего обнаружения; отправляет информацию отслеживающему радару; создание (генерация) плана перехвата ракеты и отправка его ракете-перехватчику в подходящий момент времени;
- ракета-перехватчик выполняет задачу перехвата и способна к ограниченному маневрированию.

Очевидно, что для полного цикла работы СПРО необходима и ракета-цель.

1.2 Агентное моделирование и понятие «агента»

Понятие «агент» не является строго установленным, но в общем случае можно говорить об «агенте» как о сущности, имеющей активность, автономное поведение, способность к самостоятельному приему решений в соответствии с некоторой заранее заданной совокупностью правил, способность к взаимодействию с окружающей средой и другими агентами (если такие существуют в рамках модели). Мультиагентные же модели в свою очередь используют множества таких агентов для построения процессов, где поведение системы возникает как следствие взаимодействия множества агентов, а не поведение системы описывает поведение каждого агента, т.е. происходит моделирование «снизу вверх» [15].

В рамках данной работы агент будет иметь следующую структуру:

- сенсор – получает информацию из внешнего мира в рамках радиуса восприятия;
- контроллер – ядро агента, состоящее из базы априорных знаний, базы правил и системы принятия решений (СПР)
- привод – исполняющий компонент агента, ответственный за применение обратной связи к окружающей среде

Примерная структура агента описана схематично на рис. 1.

Согласно приведенной на рис. 1 схеме, агент способен принимать решения в соответствии с логическими высказываниями, хранящимися в его базах и / или на основании результатов вычислений. СПР является самой важной частью агента, т.к. именно она отвечает за принятие решений. СПР работает по следующему алгоритму: построение модели ограничений на основании данных, полученных из сенсора; выбор наиболее подходящего поведения на основании базы правил и априорной базы знаний. В целом, СПР может имплементировать механизм дополнительного обучения, позволяющий изменять существующие правила и знания и / или добавлять новые.

В рамках рассматриваемой в данной работы СПРО, компоненты моделируются с использованием мультиагентного подхода, то есть каждый компонент системы представляет собой агент. СПР решений командного

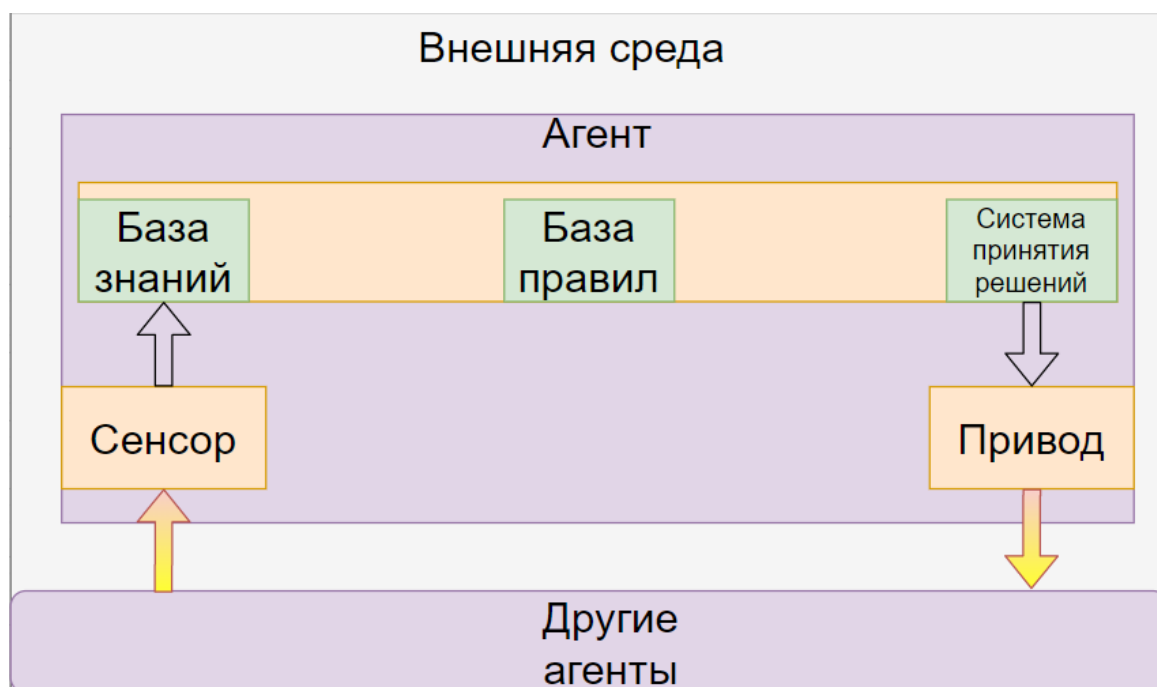


Рис. 1: Схематическое описание структуры агента и среды

центра СПРО будет генерировать планы перехвата цели динамически, используя для этого данные с радаров обнаружения и вычислительный эксперимент в рамках СПРО. Агенты СПРО показаны на рис. 2. Компоненты одинакового цвета имеют одинаковые возможности.

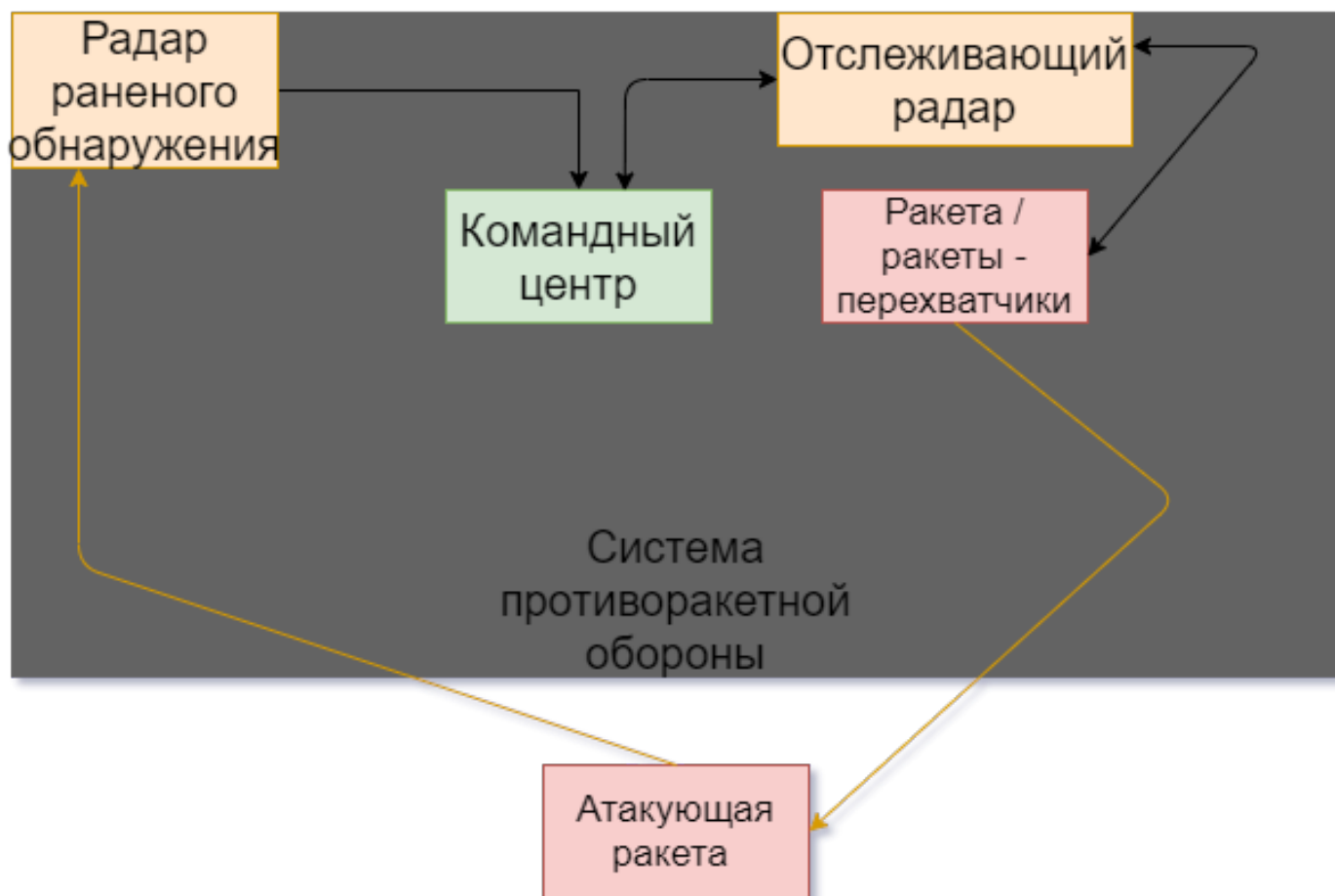


Рис. 2: Схематическое описание структуры СПРО, связей в ней и воздействия атакующей ракеты

Агент «командный центр»

Агент «командный центр» выполняет назначение конкретной ракеты-перехватчика на цель и посылает инструкции о запуске. Ниже представлена таблица знаний данного агента.

Свойство	Значение
Позиция командного центра (координаты)	широта, долгота, высота
Позиция ракеты-перехватчика	широта, долгота, высота
Угол наклона ракеты-перехватчика	вычисляется с помощью формул сферической геометрии
Время запуска ракеты-перехватчика	вычисляется в рамках решения задачи Ламберта

Время подлета ракеты-перехватчика к цели	вычисляется в рамках решения задачи Ламберта
Вероятность перехвата	вычисляется ракетой-перехватчиком

Таблица 1: Таблица знаний командного центра

Правила командного центра включают правила оценки угроз и правила выбора ракеты перехватчика. Эти правила поддерживаются нижеописанной моделью принятия решений.

Вычислительная модель назначения ракеты-перехватчика. Эта модель генерирует план-назначение ракет-перехватчиков. Для этого используются местоположение, тип и количество доступных ракет-перехватчиков, уровень угрозы и количество атакующих ракет и время их определения.

Вычислительная модель для точки перехвата. Точка перехвата определяется как точка, находящаяся на траектории атакующей ракеты и ближе всего к максимальной высоте ракеты-перехватчика, что позволит запускать дополнительные ракеты в случае неудачи. В свою очередь, траектория атакующей ракеты определяется посредством анализа данных, накапливаемых радаром раннего обнаружения и отслеживающим радаром. Эти данные являются массивом, где каждый элемент имеет вид «пара {координаты, время} ». Максимальная высота, достигаемая ракетой-перехватчиком вычисляется из характеристик этой ракеты, но в данной работе для упрощения вычислений является свойством самой ракеты.

Вычислительная модель определения времени запуска ракеты-перехватчика. Пусть T_L – время запуска ракеты-перехватчика; T_e – момент времени, когда цель окажется в точке перехвата; T_f – время полета ракеты-перехватчика к точке перехвата; T_p – время подготовки ракеты-перехватчика к запуску, в данной работе полагаемое константной (однако, можно предположить, что в реальности этот параметр будет вести себя как модуль квадратичной функции, зависящей от кол-ва подготовленных ракет-перехватчиков, с положительным старшим коэф-том и ну-

левым дискриминантом, возникающим при приравнении этой функции нулю). Тогда $T_L = T_e - T_f - T_p$.

Модель вычисления угла наклона Пусть A – точка запуска ракеты-перехватчика, B – предполагаемая точка перехвата, северный полюс – C . Тогда эти три точки вместе с геоцентрической точкой o (центр Земли) формируют сферический треугольный конус; A, B, C представляют угол между двумя гранями, а a, b, c – геоцентрический угол между двумя точками. Получаем, что угол наклона $\theta_f = \arccos(\cos(a) \cdot \cos(b) + \sin(a) \cdot \sin(b) \cdot \cos(c))$, где $a = 90 - T_{Lat}$, $b = 90 - L_{Lat}$, $C = T_{Lon} - L_{Lon}$, где L_{Lon} , L_{Lat} и T_{Lon} , T_{Lat} представляют собой долготу и широту точки запуска и целевой точки перехвата.

Модель вычисления параметров уничтожения ракеты-цели. Установив начало координат в центр Земли и положив OX как ось, соединяющую центр Земли и точку пуска ракеты, получим полярную систему координат. Обозначим r_1 , r_2 , вектор точки запуска и вектор перехвата из геоцентрической точки начала координат; θ_f – угол наклона получаемый как $\theta_f = \arccos(\frac{r_1 \cdot r_2}{|r_1| \cdot |r_2|})$; γ – угол наклона траектории получаемый как $\gamma = \frac{\pi - \theta_f}{4}$ при движении по траектории с минимальной энергией; μ – гравитационная константа. Согласно уравнению Ламберта [16], скорость перехвата ракеты V_s удовлетворяет условию $V_s = \sqrt{\frac{|r_2|(1 - \cos\theta_f)\mu}{|r_1|^2 \cdot \cos(\gamma^2) - |r_2| \cdot \cos(\theta_f + \gamma) \cdot \cos\gamma}}$. Так как траектория полеты – эллипс, то время полеты ракеты рассчитывается как $t_f = \frac{|r_1|}{V \cdot \cos(\gamma) \left(\frac{\tan(\gamma)(1 - \cos\theta_f) + (1 - \lambda \sin\theta_f)}{(2 - \lambda) \frac{|r_1|}{|r_2|}} \right)} + \frac{2\cos\gamma}{\lambda((2/\lambda) - 1)^{1.5}} \arctan \frac{((2 - \lambda) - 1)^{0.5}}{\cos\gamma \cdot \operatorname{ctg}(\frac{\theta_f}{2}) - \sin\gamma}$, где $\lambda = |r_1| \cdot \frac{V^2}{\mu}$.

Агент «ракета»

В терминах ООП, «ракета» является абстрактным базовым классом, от которого наследуются атакующая ракета и ракета-перехватчик. База его знаний хранит данные, необходимые для вычисления траектории и включает позицию и скорость ракеты, т.е. в каждый момент времени известна широта, долгота, высота и скорость ракеты.

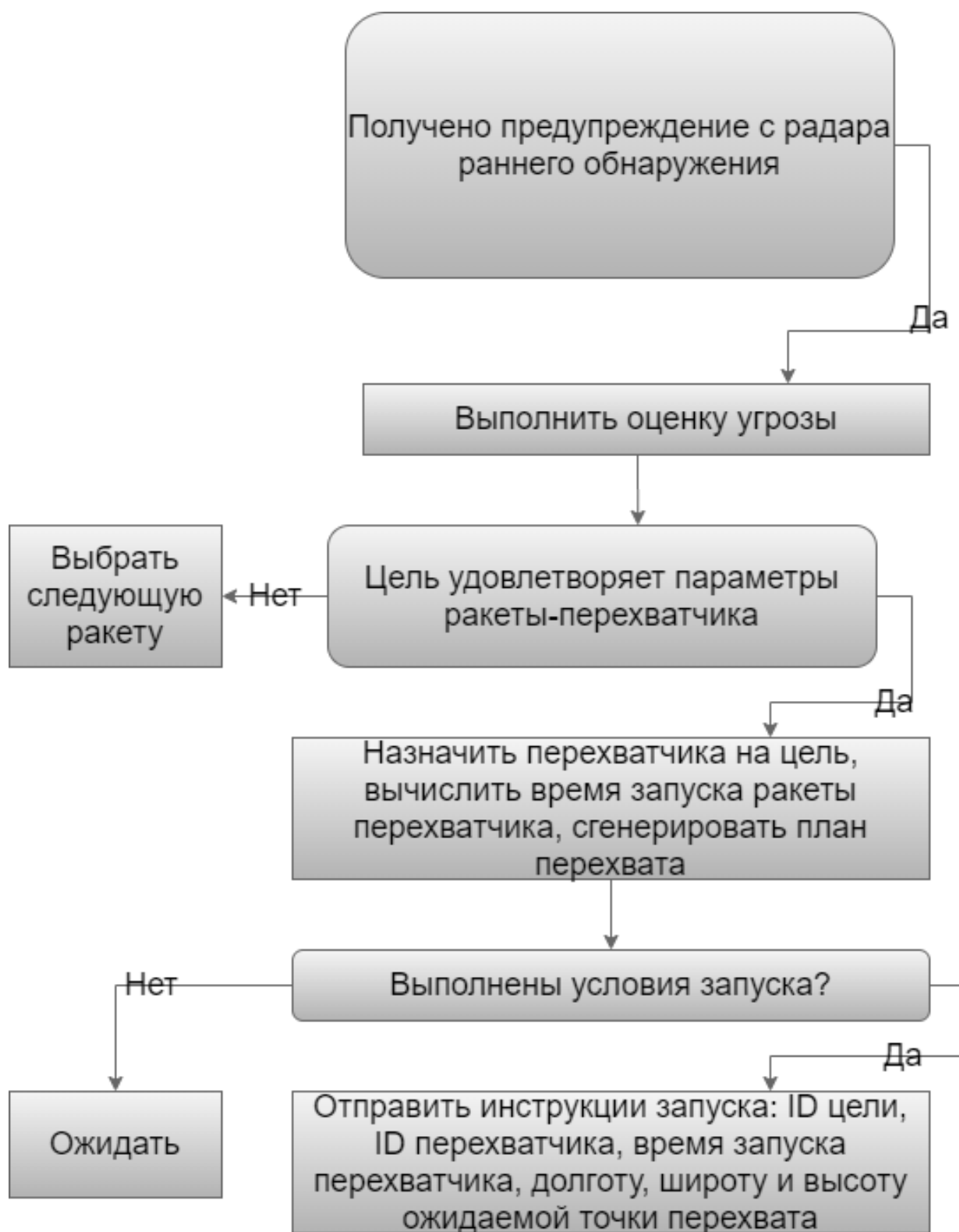


Рис. 3: Блок схема принятия решения командным центром

Агент «радар»

Как и в прошлом случае, «радар» является абстрактным базовым классом. База знаний радара содержит преимущественно данные для вычис-



Рис. 4: Блок схема принятия решения ракетой-перехватчиком

ления радиуса радарного покрытия и угла покрытия. Правила радара включают правила обнаружения и правила предсказания движения ракеты. Правила обнаружения вычисляют область радарного покрытия через радарное уравнение и считается, что любой объект в области радарного покрытия мгновенно обнаруживается при первом сканировании,

т.е. в рамках данной работы не рассматриваются цели с активным подавлением радаров или постановкой помех; правила предсказания отсылают информацию в командный центр если объект был замечен хотя бы трижды.

Полагая, что ракета цилиндрической формы, обозначим r – радиус ракеты, h – длина боеголовки, λ – длина волны сигнала радара, h_1, h_2, h_3 – длина двигателей этапа с соответствующим номером. Эффективный поперечник рассеяния (ЭФР) зависит также от угла между радаром и проекций движения ракеты на ОУ, обозначенным как θ Тогда эффективный поперечник рассеяния ракеты-цели согласно эмпирической формуле равен $R = 2\pi r(\frac{h_1^2}{\lambda} + \frac{h_2^2}{\lambda} + \frac{h_3^2}{\lambda} + \frac{4}{9\lambda h} \cdot \sqrt{(r^2 + h^2)^3}) * \cos\theta$.



Рис. 5: Блок схема принятия решения радаром раннего обнаружения

1.3 Система обозначений и ограничений для алгоритма

Введем систему обозначений, которые в дальнейшем будут использованы для описания компонентов в алгоритме перехвата целей.

Обозначение	Определение
n	кол-во атакующих ракет-целей
$j \in [0; n]$	номер атакующей ракеты
T_j	«угроза» атакующей ракеты № j
R_j	время на перехват ракеты № j как расстояние от размещения перехватчиков до цели
C_j	фактор возможного вмешательства командира
D_j	расстояние от атакующей ракеты № j до цели (цель общая для всех ракет)
S_j	максимальная скорость ракеты № j
m	кол-во ракет перехватчиков
$i \in [0; m]$	номер ракеты-перехватчика
V_i	«цена» ракеты-перехватчика № i
w_k	массив (вектор) специальных весов
$P_{ij} (P_{ij} \in [0; 1])$	вероятность перехвата ракетой i ракеты j
x_{ij}	Булеан, указывающий назначена ли ракета i на ракету j

Таблица 2: Символы, используемые для обозначения компонентов алгоритма

Отбросим ситуации, где n или m равны 0, т.к. это автоматически приводит к бесконечному множеству решений или пустому множеству решений соответственно. Также заметим, что в рамках этой работы $m \geq n$.

При решении задачи должны соблюдаться следующие ограничения:

1. Для обеспечения безопасности целей, атакуемых ракетами, необходимо назначить хотя бы одну ракету-перехватчик на каждую цель и приоритет по кол-ву ракет и очередности назначения должен отдаваться ракетам с максимальной «угрозой» и назначаться должны ракеты с минимальной «стоимостью», что позволит избежать быстрого расхода самых «лучших ракет-перехватчиков». Это можно выразить таким фитнесом: $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{T_j P_{ij} x_{ij}}{V_i x_{ij}}$.
2. Генерация плана перехвата зависит от оперативности и качества данных, приходящих с радара. Хорошообнаруживаемая ракета лучше отслеживается и должна иметь более высокий приоритет.
3. Приоритет перехвата также отдается ракетам, более близким к обороняемым целям.
4. Предпочтительно перехватывать ракеты с более высокой скоростью.
5. Вмешательство командира, основанное на эмпирическом внешнем знании играет максимальную роль.

С учетом вышеизложенного, фитнес может быть описан следующим образом $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{P_{ij} \prod_{k=1}^3 w_k T_j S_j C_j}{\prod_{l=4}^6 w_l V_i x_{ij} R_j D_j}$.

Для увлечения адаптируемости, положим $w_x = 1, x \in [1; 6]$

2 Алгоритм роя частиц переменной окрестности с отрицательным отбором и его применение

2.1 Общая идея алгоритма

Метод роя частиц (МРЧ) использует множество частиц [18], [17], каждая из которых представляет потенциальное решение и для каждой частицы можно посчитать фитнес-функцию, служащую для отбраковки худших решений. Изначально множество частиц инициализируется случайными значениями, однако важно, что каждая частица, являющаяся вектором, должна иметь многомерное равномерное распределение внутри своих значений. Текущая позиция частицы записывается n -мерным вектором и обозначается как $X = (X_1, \dots, X_n)$. i -ый элемент частицы в поисковом

пространстве S обозначается как $X_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ \vdots \\ x_{iD} \end{bmatrix}$; текущая скорость частицы

обозначается как $V_i = \begin{bmatrix} V_{i1} \\ \vdots \\ V_{iD} \end{bmatrix}$; локальная лучшая позиция $P_i = \begin{bmatrix} P_{i1} \\ \vdots \\ P_{iD} \end{bmatrix}$;

глобальное наилучшее решение обозначается как $P_g = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ \vdots \\ P_{gD} \end{bmatrix}$.

Обозначим через w инерционный вес, позволяющий балансировку локального и глобального поиска; k – номер итерации; V_{id} – скорость частицы i в d -ом пространстве; r_1, r_2 – случайные вещественные числа, такие, что $0 \leq r_i \leq 1, r_i \in \mathbb{R}, i \in \{1, 2\}$; c_1, c_2 – неотрицательные константы, "факторы ускорения". Скорость и позиция каждой частицы обновляются итеративно по следующей формуле [19, с. 519]:

$$V_{id}^k = wV_{id}^{k-1} + c_1r_1(P_{id}^{k-1} - X_{id}^{k-1}) + c_2r_2(P_{gd}^{k-1} - X_{id}^{k-1}); X_{id}^k = X_{id}^{k-1} + V_{id}^k \quad (2.1.1)$$

. Для исключения невалидных решений, позиции и скорости частиц ограничены интервалами $[-X_{max}; X_{max}]$ и $[-V_{max}; V_{max}]$ соответственно.

Фитнес каждой частицы вычисляется на каждой итерации; новое значение фитнес-функции сравнивается с текущими локальной и глобальной лучшей позицией; если новое значение превосходит старое, то локальная лучшая позиция будет обновлена и затем среди локальных лучших позиций проводится поиск по максимум фитнес функции; если этот максимум превосходит фитнес функцию глобального лучшего решения, то глобальное лучшее решение заменяется локальным лучшим решением с указанным максимумом. Во избежание закливания алгоритма вводится произвольное достаточно большое число T_{max} , ограничивающее число итераций алгоритма; в рамках реализации данного алгоритма T_{max} постепенно убывает, что отражает ограниченное время на принятие решения при все более близкой ракете-цели. В конце выполнения алгоритма, наступит ли он сам по достижению заданной точности ли будет прерван T_{max} , вектор P_g содержит лучшее решение и представляет собой «выходные данные» данного алгоритма.

Общие идеи применения указанного выше алгоритма в этой работе похожи на таковые в работе Ченга, Ли и Зенга [19] и изложены далее. Во-первых, необходимо убедиться в назначении адекватного кол-ва перехватчиков на одну цель. Для этого сгенерированная и/или обновленная частица должна обновляться по правилу замены повторяющихся элементов в этой частице. Также необходимо избежать выхода скорости частицы за границу V_{max} . Для выполнения двух предыдущих условий можно представить формулу 2.1.1 в виде [19, с. 519]

$$V^k = \begin{cases} V_{max}, V^k > V_{max} \\ V^k, V_{min} \leq V^k \leq V_{max} \\ V_{min}, V^k < V_{min} \end{cases} ; X^k = \begin{cases} X_{max}, X^k > X_{max} \\ X^k, X_{min} \leq X^k \leq X_{max} \\ X_{min}, X^k < X_{min} \end{cases} \quad (2.1.2)$$

В-третьих, для обеспечения более равномерной сходимости, параметр w будет убывать линейно по формуле [19, с. 519]: $w = w_{end} + (\frac{T_{max}-k}{T_{max}})(w_0 - w_{end})$.

В-четвертых, c_1, c_2 можно использовать не как константы, а переменные, обозначающие фактор самообучения и группового обучения соот-

ветственно и изменяющиеся согласно формуле [19, с. 519]:

$$\begin{cases} c_1 = c_{1_{min}} + \frac{(c_{1_{max}} - c_{1_{min}})k}{T_{max}} \\ c_2 = c_{2_{min}} + \frac{(c_{2_{max}} - c_{2_{min}})k}{T_{max}} \end{cases} \quad (2.1.3)$$

Введем вспомогательную переменную K – фактор сужения, необходимый для улучшения сходимости алгоритма. Введем для этого дополнительную переменную $\phi = c_1 + c_2 : \phi \geq 2$ и дополнительные обозначения: N_r – радиус окрестности, меняющийся в ходе итераций; P_{id}^k – собственное экстремальное значение частицы; $P_{N_r,d}^k$ – экстремальное значение соседа. Тогда $K = \frac{2}{|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}|}$. С учётом этих нововведений в практической реализации работы будет использована следующая формула для обновления скорости частицы [19, с. 520]:

$$V_{id}^k = wV_{id}^{k-1} - c_1 r_1 (X_{id}^{k-1} - P_{id}^{k-1}) - c_2 r_2 (X_{id}^{k-1} - P_{N_r,d}^{k-1}) \quad (2.1.4)$$

.

Теперь опишем упомянутый в начале главы процесс «отрицательный отбор». «Отрицательный отбор» позволяет оптимизировать процесс варьирования окрестности, необходимый чтобы избежать попадания алгоритма в локальный экстремум посредством обновления некоторых частиц до тех пор, пока не достигнуто условие. Основная идея процесса заключается в итеративном обновлении частиц в соразмерно параметру R_u при сходимости алгоритма. В свою очередь, сходимость алгоритма в процессе его выполнения определяется фактом того, что сходство частиц больше некоторого предела сродства T_{aff} . Обозначим сходство частицы p в d -ом измерении как A_{pd} , P_{gd} – глобальное экстремальное значение. Сходство частицы p в d -ом измерении описывается $A_{pd} = 1 + \frac{|P_{gd} - x_{pd}|}{X_{min} - X_{max}}$ [19, с. 520].

Также введем формулу для сродства p -ой частицы как среднее сродство всех размерностей: $A_{pd} = \frac{\sum_{d=1}^D A_{pd}}{D}$ [19, с. 520].

Теперь опишем с помощью простой блок-схемы ниже алгоритм отрицательного отбора для каждой частицы. Заметим, что согласно этой блок-схеме, механизм отрицательного отбора будет задействован толь-

ко при достижении частицей состояния, в котором каждая размерность частицы меньше T_{aff} .



Рис. 6: Блок-схема процесса «отрицательного отбора»

После введения всех необходимых формул, изложения концепций и алгоритмов, играющих вспомогательную роль, опишем непосредственный алгоритм АРЯПОСОО.



Рис. 7: Блок-схема процесса работы алгоритма роя частиц переменной окрестности с отрицательным отбором

2.2 Реализация алгоритма и интеграция его в СПРО

Для быстроты написания, переносимости и использования готовых вспомогательных решений был выбран язык программирования Python 3.7.7.

Для агентов был введен абстрактный базовый класс «Abstract Base Class Agent» и все используемые агенты являются экземплярами классов-наследников. Компоненты СПРО коммуницируют между собой с помощью веб-сокетов [20]. Для симуляции передвижения ракет в трехмерном пространстве ракеты хранят на каждой итерации тройку координат внутри своего экземпляра, а «сканирование» радаром ракет происходит как анализ всех существующих в данный момент ракет с проверкой нахождения координат внутри области анализа. Возможно, такой подход не является полностью точным, но значительно экономит память и упрощает описание процесса «сканирования»; альтернативой данному подходу является создание трехмерного массива, дискретно описывающего пространство.

Большой трудностью является реализация одновременно происходящих параллельных событий. Обычно, в студенческих работах для этого вводят некоторый порядок синхронных непараллельных действий и при этом предполагается, что вычисление этих действий происходит настолько быстро, что время исполнения кода ЦПУ не будет заметным. Однако, алгоритм АРЯПОСОО является затратным по времени, поэтому такой подход в данной работе невозможен. Вместо этого было решено использовать реальное параллельное выполнение кода. Проблемой Python в этой области является GIL ("Global Interpreter Lock"), однако, этого удалось избежать с использованием Thread- и ProcessPoolExecutor и запуском каждой ракеты как отдельного процесса `Process.spawn()` из модуля `multiprocessing`. Для реализации одновременности и параллельности каждый компонент выполняется в бесконечном цикле и «спит» 0.1 секунды после каждого своего «тика» (минимальная единица времени и действия); «сон» с использованием `time.sleep()` необходим для создания пауз в выполнении кода процессором и переключении контекста выполнения, иначе потребление ресурсов ЦПУ данным компонентом будет по-

стоянным и вызовет задержки в переключении потока управления, когда число компонентов превысит число логических потоков ЦПУ, что в свою очередь создаст проблемы с симуляцией одновременности. Также заметим, что для быстрого освобождения ресурсов, поток и процесс ракеты при взрыве сразу останавливается и объект ракеты удаляется вручную.

Сама СПРО состоит из генератора атакующих ракет, который с заданной интенсивностью генерирует случайное нормально распределенное на заданном интервале кол-во атакующих ракет с разными параметрами полезной нагрузки, скорости и высоты (для простоты, этот компонент сразу генерирует ракеты находящиеся на этапе прохождения тропосферы), аналогичного генератора ракет-перехватчиков, имитирующего «подвоз» ракет-перехватчиков в случайное время с интенсивностью, возрастающей по мере истощения запаса, трех радаров раннего обнаружения, 9 радаров отслеживания и переменного кол-ва ракет-перехватчиков, ограниченных сверху максимальной вместительностью склада, множества защищаемых объектов (программа завершает работу при полном уничтожении всех защищаемых объектов).

Для бóльшей реалистичности, радары раннего обнаружения, как и радары отслеживания, имеют различный эффективный радиус обнаружения. Для простоты предполагается, что атакующие ракеты входят в имитируемую область «слева направо» и все радары «сканируют область», радиус-вектор которой направлен «слева-направо».

Основное принятие решения и генерация плана-перехвата генерируется внутри командного центра, т.е. именно в нём выполняется АРЯ-ПОСОО каждый раз по мере появления новых ракет-целей и ракет-перехватчиков, т.е. при появлении новой ракеты-перехватчика с характеристиками, превосходящими характеристики уже отправленной/отправленных ракеты/ракет и при отсутствии более важных целей, возможно назначение дополнительных ракет. Таким образом, генерация новых планов-перехватов происходит только после наступления события «новая ракета-цель обнаружена радаром» или «на склад поступила новая ракета-перехватчик». Также, для реализации неблокирующей работы командного центра (т.е. работы, неблокирующей прием-передачу сигналов), для генерации каждого плана-перехвата создается отдельный процесс с помощью модулю

multiporrocessing в режиме «spawn», где на каждой итерации проверка каждой частицы на достижение предела сходства происходит внутри отдельного потока внутри ProcessPoolExecutor. Данный подход позволяет максимально задействовать ресурсу ЦПУ при вычислениях в АРЯПО-СОО.

2.3 Тестирование и сравнение результатов работы с аналогичными моделями

Для запуска данной модели был использован компьютер со следующими характеристиками: OS: Ubuntu 18.04.4 LTS

Разрядность: x64

CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 v3 @ 3.50GHz

Оперативная память: 126 Гб

Самыми важными параметрами является предел сходства T_{aff} и параметр R_u . Для определения оптимального значения этих параметров был проведен оптимизационный эксперимент, результаты которого показаны ниже.

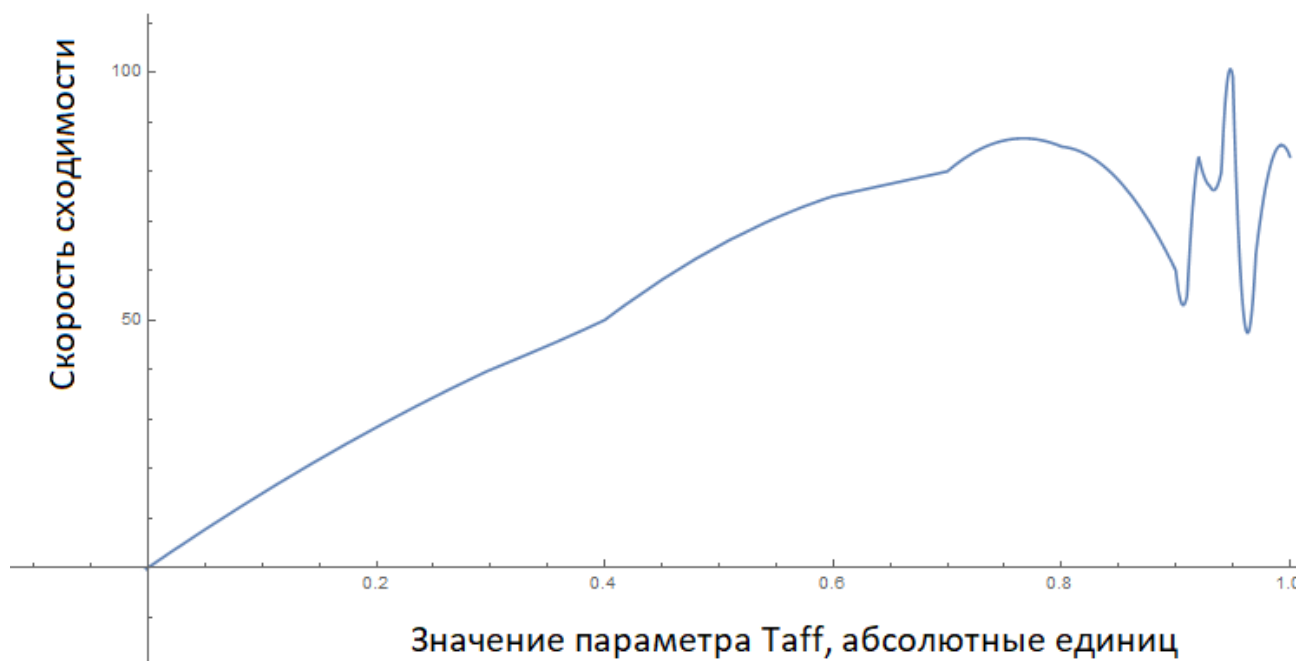


Рис. 8: Скорость сходимости алгоритма при различных значениях параметра T_{aff}

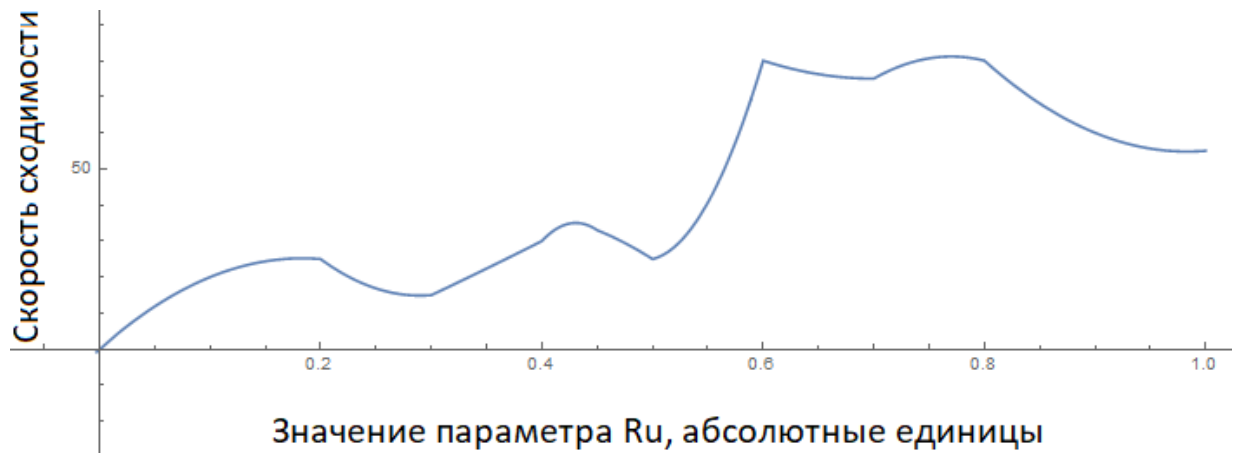


Рис. 9: Скорость сходимости алгоритма при различных значениях параметра R_u

Алгоритм	Средняя скорость сходимости, %	Среднее кол-во итераций
PSO	80.3	975
CFPSO	85.1	937
LDPSO	87.6	850
VNPSO	91.5	715
VNVNNSPSO	96.8	720
АРЯПОСОО	92.333	698

Таблица 3: Скорость сходимости и среднее кол-во итераций различных методов

Таким образом, оптимальная скорость сходимости (в процентах от 10^5 итераций) достигается в $T_{aff} = 0.96, R_u = 0.63$.

Будем считать, что алгоритм сходится при точности в 99.5% от оптимального решения. Выполнив 10^6 итераций каждого алгоритма ниже, имеем следующие скорости сходимости и среднее кол-во итераций, [19, с. 521].

Как видим, несмотря на не самый лучший результат в средней скорости сходимости, алгоритм АРЯПОСОО работает быстрее всех остальных, что позволяет использовать его как основной, если задача, к которой он применяется, ограничена по времени [19, с. 522-524].

Разработанная программа генерирует планы-перехваты подобного вида:

1	ID ракеты-цели	Множество ID ракет-перехватчиков	Долгота	Широта	Высота	Время ожидаемого перехвата
2	timestamp(время обнаружения ракеты)	{timestamp(время запуска ракеты)_1, timestamp_2, timestamp_3}	float	float	float	timestamp
3	1591213981	{1591214071, 1591214084}	44.936543	34.135372	6273.2	1591214123

Рис. 10: Пример плана-перехвата, генерируемого программой (пост-визуализация в стороннем ПО)

Выходной формат .csv позволяет импортировать данные в любой табличный процессор для последующей их обработки и визуализации. Во избежание ситуации неправильного вывода, формируемого при многопоточной работе приложения, вывод данных на консоль или файл осуществляет отдельный поток.

Заключение

Разработанный и протестированный алгоритм имеет как преимущества, так и недостатки, рассмотрим их подробнее.

Преимущества:

- Полная симуляция одновременно происходящих параллельных процессов;
- Минимальное, по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами, число итераций;
- Возможность экспортировать данные в табличные процессоры для пост-обработки;
- Низкие затраты по памяти – запущенное приложение при 10 активных ракетах-целях, 30 активных ракетах-перехватчиках и 100 ракетах-перехватчиков на складе потребляет около 500 Мб ОЗУ;
- Высокие возможности распараллеливания алгоритма на критических участках – потенциальный источник еще большей оптимизации исполнения алгоритма.

Недостатки:

- Не самая высокая скорость сходимости среди рассмотренных;
- Симуляция параллельных событий требует процессора со значительным числом ядер и логических потоков, которые часто отсутствуют на встраиваемых системах, реально используемых в подобной технике. Так, описанное выше кол-во объектов создает около 50 процессов и более 100 потоков;
- Алгоритм рассматривает упрощенную схему полёта ракеты-цели и не учитывает возможных положений, допускающих оптимизацию процесса перехвата.

Были решены следующие задачи:

- Описана СПРО для которой построена модель и агенты, участвующие в ней;
- Описана система принятия решений и накладываемые на нее ограничения, алгоритм принятия решений;
- алгоритм принятия решений был реализован в виде ПО, протестирован и сравнён с другими подобными алгоритмами;
- были решены различные задачи, возникающие в области многоточечного программирования;
- были сделаны выводы о потенциале и возможностях развития развития данного алгоритма.

К сожалению, не удалось реализовать дополнительную цель и построить полноценный интерфейс приложения, позволяющий ввод-вывод данных и, самое важное, демонстрацию работы алгоритма посредством показа назначения ракет-перехватчиков на цели и непосредственно перехватом.

Несмотря на неидеальные параметры работы алгоритма, он всё же демонстрирует высокую скорость исполнения. Отметим, что как сам алгоритм АРЯПОСОО, так и модель, имитирующая СПРО, допускают в будущем модификации как расширяющие функционал СПРО, так и модифицирующие непосредственно работу самого алгоритма АРЯПОСОО.

Список использованной литературы

1. R. Handberg. «The symbolic politics of ballistic missile defense: seeking the perfect defense in an imperfect world». *Defense and Security Analysis* 31(1), 44 – 58, 2015.
2. E. Marshall. «A midcourse correction for U.S. missile defense system». *Science* 339(6127), 1508 – 1511, 2013.
3. S. Ganguly. «India's pursuit of ballistic missile defense». *The Nonproliferation Review* 21(3/4), 373 -380, 2014.
4. U. B. Nguyen. «Assessment of a ballistic missile defense system». *Defense and Security Analysis* 30(1), 4 – 17, 2014.
5. M. J. Armstrong. «Modeling short-range ballistic missile defense and Israel's iron dome system». *Operations Research*, 62(5), 1028 – 1040, 2014.
6. S. Sommerer, M. D. Guevara, M. A. Landis, et al. «Systems-of-systems engineering in air and missile defense». *John Hopkins APL Technical* 31(1), 5 – 20, 2012.
7. Z. L. Cheng, L. Fan, Y. L. Zhang. «A framework for equipment systems-of-systems effectiveness evaluation using parallel experiments approach». *Journal of Systems Engineering and Electronics* 26(2), 292 – 300, 2015.
8. J. H. Holland. «Studying complex adaptive systems». *Journal of System Science and Complexity* 19, 1 – 8, 2006.
9. C. M. Macal, M. J. North. «Tutorial on agent-based modeling and simulation». *Journal of Simulation*, 2010 4(3): 151 – 162.

10. O. T. Holland, S. E. Wallace. «Using agents to model the kill chain of the ballistic missile defense system». *Naval Engineer Journal*, 123(3), 141 – 151, 2011.
11. C. J. Lynch, S. Y. Diallo, A. Tolk. «Representing the ballistic missile defense system using agent-based modeling». *Proc. of the Military Modeling and Simulation Symposium*, 1 – 8, 2013.
12. C. D. Connors, J. O. Miller, B. J. Lunday. «Using agent-based modeling and a designed experiment to simulate and analyze a new air-to-air missile ». *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology* 12(5), 1 – 10, 2015.
13. T. Bui, J. Le. « An agent-based framework for building decision support systems ». *Decision Support Systems* 25(3), 225 – 237, 1999.
14. L. Y. Li, F. X. Liu, G. Z. Long, et al. «Modified particle swarm optimization for BMDS interceptor resource planning». *Applied Intelligence* 43(2), 1 – 18, 2015.
15. M. Wooldridge. «An introduction to multi agent systems». Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
16. R. H. Gooding. «A procedure for the solution of Lambert’s orbital boundary-value problem». *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* (48), 145 – 165, 1990.
17. Кондратьев М. А., Ивановский Р. И., Цыбалова Л.М. Применение агентного подхода к имитационному моделированию процесса распространения заболевания / М.А. Кондратьев, Ивановский Р.И., Цыбалова Л.М. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2010. № 2. - С. 189–194.
18. R. Eberhart, J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. *Proc. of the Sixth International Symposium on MicroMachine and Human Science*, 39 – 43, 1995.

19. Zilong Cheng, Li Fan, Yulin Zhang. «Multi-agent decision support system for missile defense based on improved PSO algorithm». Journal of Systems Engineering and Electronics Vol. 28, No. 3, 514 – 525, 2017.
20. Library for building WebSocket servers and clients in Python. GitHub [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://github.com/aaugustin/websockets>