ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 111 за 2019 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Балута В.И., Осипов В.П., Четверушкин Б.Н., Яковенко О.Ю.

# Моделирование динамики и адаптация в пространстве состояний конфликтного взаимодействия интеллектуальных агентов

***Рекомендуемая форма библиографической ссылки:*** Моделирование динамики и адаптация в пространстве состояний конфликтного взаимодействия интеллектуальных агентов / В.И.Балута [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 111. 32 с. doi:10.20948/prepr-2019-111
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-111

**О р д е н а  Л е н и н а**
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**
**имени М.В.Келдыша**
**Р о с с и й с к о й  а к а д е м и и  н а у к**

**В.И. Балута, В.П. Осипов, Б.Н. Четверушкин,**
**О.Ю. Яковенко**

# Моделирование динамики и адаптация в пространстве состояний конфликтного взаимодействия интеллектуальных агентов

**Москва — 2019**

*В.И. Балута, В.П. Осипов, Б.Н. Четверушкин, О.Ю. Яковенко*

**Моделирование динамики и адаптация в пространстве состояний конфликтного взаимодействия интеллектуальных агентов**

Представлены результаты исследований, направленных на разработку математических методов имитационного моделирования конфликтов в условиях существенной неопределённости на базе мультиагентного подхода. Предложена структура параметров для описания состояния агентов в фазовом пространстве конфликтного взаимодействия, позволяющих проводить целенаправленный анализ динамики обстановки и формировать адаптивное поведение интеллектуальных агентов. Рациональность траектории достижения цели в фазовом пространстве оценивается по критериям допустимости ресурсных затрат и степени близости к целевому состоянию. Предложенный подход позволяет выработать эффективную стратегию поведения в конфликте с учётом возможного противодействия со стороны противника. Приведены результаты численных экспериментов, демонстрирующие предлагаемые методические подходы.

***Ключевые слова:*** интеллектуальные агенты, конфликтная среда, траектория конфликта, фазовое пространство, пространство состояний, электронный полигон

*V.I. Baluta, V.P. Osipov, B.N. Chetverushkin, O.Y. Yakovenko*

**Simulation of dynamics and adaptation in the space of conflict interaction of the intelligent agents**

The article presents the results of research aimed at developing mathematical methods of conflict simulation in conditions of significant uncertainty on the basis of multi-agent approach. The structure of parameters for describing the state of agents in the phase space of conflict interaction is developed. It allowed to carry out the purposeful analysis of dynamics of a situation and to form adaptive behavior of intelligent agents. The efficiency of the trajectory of achieving the goal in the phase space is estimated by the criteria of the admissibility of resource costs and the degree of proximity to the target state. The proposed approach makes it possible to develop an effective strategy of behavior in the conflict, taking into account the possible opposition from the enemy. The results of numerical experiments demonstrating the proposed methodological approaches are presented.

***Key words:*** intelligent agents, non-conflict environment, conflict trajectory, phase space, state space, electronic polygone

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 16-29-09550-офи_м.

# Введение

В антагонистическом конфликте эффективность достижения целей зависит от принятой стратегии поведения, скорости принятия решений в изменяющейся обстановке и степени их соответствия текущей ситуации.

Проблемная сложность решения этих вопросов напрямую связана с уровнем неопределённости, который в конфликтной обстановке часто обусловлен нехваткой времени на получение необходимой для принятия решений информации.

С учётом современного развития компьютерных технологий численное моделирование приобретает роль того инструмента, с помощью которого можно исследовать разнообразные конфликты для выявления роли и значимости тех или иных моделей поведения, определения перечня результативных действий в различных ситуациях.

Для выделения сферы научного приложения методов и средств исследования конфликтов в условиях существенной неопределённости, а также разработки специализированных методов оперативной выработки рациональных решений в условиях ограниченных по времени и информационному обеспечению ресурсов предложено рассматривать их в рамках неоконфликтологии [1] – раздела конфликтологии, изучающего особенности взаимодействия объектов конфликтной среды в условиях неопределённости на основе современных высокопроизводительных вычислительных систем и методов интеллектуального поиска решений.

Представляемые здесь результаты являются составной частью исследований в рамках гранта РФФИ № 16-29-09550-офи_м, целью которых является развитие методов математического моделирования для обеспечения безопасности мест массового скопления людей и других критически важных объектов. В опубликованных ранее коллективом исполнителей результатах исследований по данной тематике [1-11] рассматривались вопросы, касающиеся анализа использующихся подходов к определению эффективности систем обеспечения безопасности, выделения нерешённых проблем, излагались по мере их эволюции концептуальные взгляды на развитие отдельных направлений, включая способы применения суперкомпьютеров как для изучения проблемной области, так и в интересах построения управляющих систем поддержки принятия оперативных решений в условиях ограниченного времени.

В данной работе основное внимание уделено методам рационального поведения в условиях конфликтного взаимодействия при наличии существенной ситуативной неопределённости. Нужно иметь в виду, что неопределённость присутствует у обеих сторон конфликта ввиду ограниченности информации относительно друг друга по многим аспектам. В большинстве использующихся на практике подходов, предназначаемых, например, для проектирования и оценки эффективности систем физической

защиты объектов, фактор неопределённости предлагается учитывать в виде вероятности наступления различных событий, которая, в свою очередь, оценивается экспертными методами. В нашем случае реализуется мультиагентный подход, потенциал которого оценивается на основе вычислительных экспериментов средствами электронного полигона.

Для математической формализации конфликта каждую из сфер его актуализации необходимо декомпозировать на характеристические параметры, описывающие состояние сторон, обозначить цели, которые они преследуют, задать диапазоны возможного изменения и значений этих параметров в текущем состоянии, формализовать действия, изменяющие значения параметров. По сути, описание области изменения параметров, характеризующих взаимное положение конфликтующих сторон, является описанием пространства состояний развития конфликта или фазового пространства. Последовательную смену состояний каждого из оппонентов в конфликте можно охарактеризовать их траекторией в этом фазовом пространстве. Поиск рациональной стратегии поведения в конфликте сводится к задаче построения в собственном фазовом пространстве рациональной траектории перемещения из текущего положения к целевому.

Благодаря возможностям компьютерного моделирования и организации вычислительных экспериментов с накоплением в ходе их осуществления определённого «опыта» можно проанализировать все возможные схемы поведения противника и обосновать наилучшие модели поведения для любой из противодействующих сторон. Заметим, что ранее в практике решения подобных задач такой подход не встречался. Наиболее близкий вариант использования имитационного мультиагентного моделирования (Multiagent Modeling System – MMS) применительно к задаче организации системы безопасности объектов описан в [12]. Но в приводимом описании программного комплекса активная роль отводится операторам, на которых возложены функции выработки и реализации решений. При этом используемые в вычислительном алгоритме модельные агенты не являются самостоятельными и их «интеллект» находится вне модели агентов.

Техника представления области конфликтного взаимодействия в виде череды сменяемых с какой-то вероятностью состояний применяется в так называемых логико-вероятностных подходах [13-16]. Но, в силу специфики формирования графа состояний, он носит схематический характер с относительно небольшим числом заметно различающихся (без промежуточных переходов) положений, что в существенной мере предопределяет качество решения.

В противовес изложенным подходам, в работах [1-11] развиваются имитационные модели на базе моделирования поведения интеллектуальных агентов (ИА) с оценкой динамики их состояний в ходе взаимодействия. На наш взгляд, подобный анализ динамически изменяющихся в ходе противоборства состояний субъектов конфликта может стать основой для формирования

рациональных стратегий поведения при развитии конфликтов в условиях неполной информации.

## Базовые положения модельного подхода

В основу разрабатываемой технологии исследования средствами численного моделирования возможных путей актуализации антагонистического конфликта положены следующие соображения.

В имитационной модели каждый из субъектов конфликта может быть представлен как «интеллектуальный» агент. Базовыми характеристиками такого агента являются формирование внутренней модели окружающего мира и представление своего места в нем, система правил по созданию и изменению этой модели, методы принятия решений на осуществление действий по адекватному реагированию в ответ на изменение ситуации. Интеллектуальные агенты имеют целенаправленное поведение на достижение некоторой цели наиболее оптимальным путём. Этот процесс сводится к постановке оптимизационных задач и поиску их решений.

Исходя из описываемых представлений, каждого из субъектов противоборства можно представить в виде некоторой комплексной системы, которая обладает определёнными ресурсами и имеет свои цели. В каждый текущий момент времени t возможности k-го субъекта зависят от его положения в фазовом пространстве состояний, которое характеризуется некоторым набором частных характеристик (параметров). Иначе, изменение его состояния $s^k$ со временем $s^k(t)$ зависит от вектора $\vec{\chi}$, отображающего положение субъекта в фазовом пространстве его состояний, к которым также относятся и физические координаты его местоположения. При этом для каждого субъекта существует собственное фазовое пространство, пересечение с пространством оппонента возможно лишь частичное. Переход субъекта из начального состояния $s^k{}_0(t_0)$, которое он имел в момент времени $t_0$, к целевому $s^k(t_m)$ в момент времени $t_m$ осуществляется через совокупность промежуточных состояний, в результате их смена представляет собой траекторию движения в фазовом пространстве.

Как уже отмечено выше, разрабатываемые средства мультиагентного моделирования ориентированы на решение широкого круга задач неоконфликтологии. Интерпретация системы мультиагентного моделирования в неоконфликтной среде содержательно подобна требованиям к описанию ИА, включая их способность функционировать в условиях нечёткой, неточной и даже противоречивой информации. Ранее в работах [1-6] отмечено, что для условий неопределённости ИА должен иметь такие интеллектуальные свойства, как возможность формирования внутренней непротиворечивой модели окружающей обстановки (функция ориентации) на основании получаемой извне информации (функция адаптации), а также выявление разного рода угроз

и рисков на основе анализа отклонений, установление причинно-следственных связей на основе стереотипных ситуаций (аналитическая функция), выявление вероятных траекторий развития обстановки в текущей ситуации и прогноза её характеристик (функция прогноза развития ситуации), выработка решений, включающая формирование последовательностей необходимых для достижения актуальных целей действий (функция планирования). Планирование действий ИА является проектированием траектории движения к цели от текущего состояния к целевому в фазовом пространстве состояний. При этом планирование деятельности в общем случае сводится к решению того или иного вида оптимизационной задачи по поиску оптимальной траектории достижения цели. Пространство состояний для решения задачи планирования представляется в форме графа переходов.

Условно отражение модели мира ИА в виде графа, согласно [7], можно отобразить в виде схемы, приведённой на рис. 1. Исходное положение условно показано кружком синего цвета, целевое – жёлтого. Выбор пути из одного состояния в другое предполагает некоторую последовательность действий (шагов), которая определяется представлениями субъекта о затратах ресурсов на совершение каждого из них и/или оценкой их близости к целевому состоянию. На схеме показано, что каждое отдельное действие связано с некоторым ресурсом реального мира, доступность которого (в представлении объекта) является фактором, определяющим возможность его совершения.

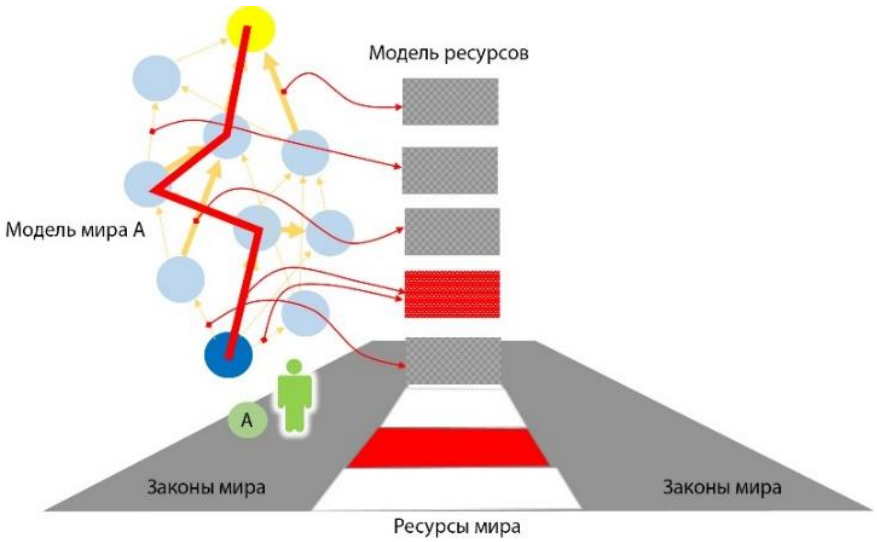



Рис. 1. Планирование действий интеллектуального агента.

Иначе поведение ИА в пространстве состояний можно отобразить в виде ценовой матрицы (рис.2.), элементы которой включают затраты на реализацию соответствующих состояний через обобщённую стоимость перемещения и нахождения в них. С помощью такой модели пространства состояний можно наглядно представить и оценить затраты ресурсов, которые необходимы в задаче планирования действий по достижению целевого состояния.

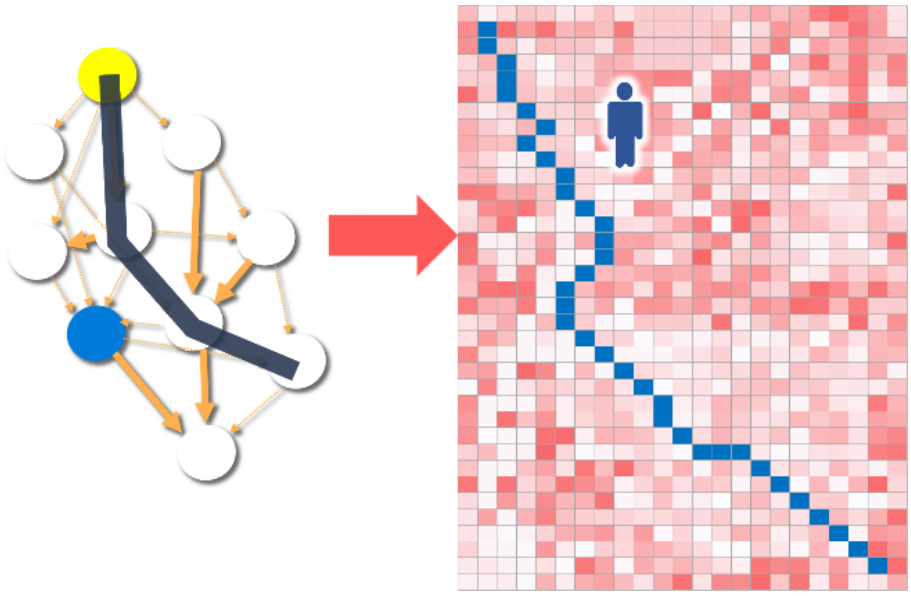


Рис. 2. Представление модели мира в виде ценовой матрицы
в пространстве состояний.

Другими словами, любое изменение параметра, описывающего какую-то из характеристик положения субъекта в фазовом пространстве, можно связать с изменением некоторой скалярной величины – цены перехода, под которой понимаются условные затраты на совершение действия. Для каждого из параметров устанавливается свой «масштаб цен», динамически зависящий от текущего состояния субъекта и обусловленный степенью «значимости» этого параметра для решения поставленной задачи.

Введение скалярного параметра «стоимости действий» (при этом «бездействие» рассматривается тоже как «форма действия») позволяет формулировать и решать задачу оптимизации при планировании стратегии на основе предположения, что рациональная траектория в фазовом пространстве состояний имеет минимальную стоимость всех переходов из начального состояния в целевое. Увеличение «стоимости траектории» рассматривается как повышение рисков недостижения поставленной цели.

Представление траектории на базе ценовой матрицы является наглядным отражением именно такой интерпретации задачи. Смысл применения этого представления в том, что через него можно задать затраты на изменение каждой из характеристик, описывающих состояние субъекта. В ячейках ценовой матрицы отражаются затраты на переход из текущего состояния в смежное с ним. Изобразив траекторию перемещения по ячейкам матрицы из одной точки в другую и просуммировав значения в ячейках, можно получить общие затраты на преодоление пути по данной траектории. Из совокупности различных траекторий можно отобрать одну или несколько оптимальных, то есть требующих меньше затрат на соответствующий переход. Свой масштаб цен и своя ценовая матрица могут быть построены для каждого из параметров. Поэтому их совокупность позволяет рассчитать затраты на изменение

состояний рассматриваемого субъекта в многомерном фазовом пространстве. В модельных расчётных задачах размер ячейки ценовой матрицы может быть произвольно малым, например, визуально отображаемым одним пикселем на схеме или экране, что позволяет перейти к понятию «карты параметра» по аналогии со слоями геоинформационных систем.

Специфику решения задачи планирования действий ИА достаточно просто отразить на базе матричного представления. На рис. 2 дана иллюстрация оптимального пути, который показан в виде цепочки клеток синего цвета. По мере движения по оптимальной траектории может возникнуть потребность анализа ситуации и перестройки траектории, поскольку в условиях неопределённости возможны резкие изменения ситуации в результате воздействия каких-то внешних обстоятельств. Как показано на рис. 3, при движении по изначально выбранной траектории воздействие внешних факторов может привести к существенному изменению состояния, которое представляется на схеме в виде «скачкообразного» перемещения в другое положение. Анализ нового состояния может привести к различным стратегиям дальнейшего поведения. Иногда целесообразно вернуться на исходную траекторию, однако смещение может оказаться и настолько существенным, что для агента выгоднее выбрать новый путь движения к цели.

Представленная иллюстрация показывает, что неполнота модели мира, которую строит ИА для анализа обстановки, а также погрешности механизмов анализа и выработки решений не позволяют однозначно спроектировать оптимальную или рациональную траекторию движения к цели в пространстве состояний. Такое положение формирует потребность в развитии интеллектуальных функций агентов. Данная проблема может быть решена путём разработки и модельной апробации различных механизмов адаптации поведения ИА к ситуации и подходов к выработке решений в условиях неопределённости.

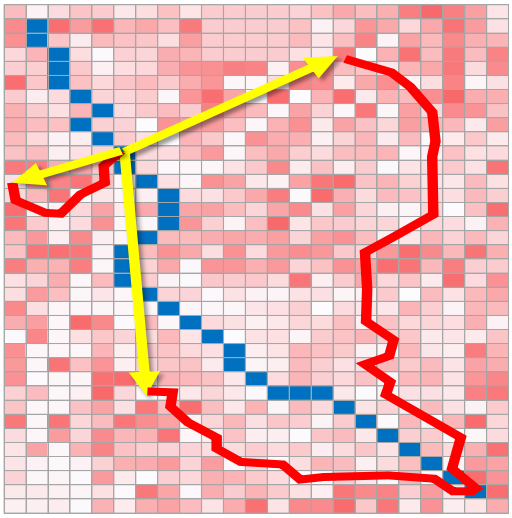


Рис. 3. Варианты возможных траекторий движения к цели после воздействия.

Общее описание базовой модели состояния ИА представляется кортежем [8, 9]:

$$\langle \Phi(FC), X, Y \rangle, \tag{1}$$

где Ф(FC) – функция нечёткого соответствия, определяющая состояние ИА; X – множество входных воздействий на ИА, Y – множество предполагаемых реакций ИА, причём декартово произведение

$$X \times Y \subseteq M\left(FC(Ag)\right) \tag{2}$$

задаёт пространство, формирующее область определения нечёткого соответствия FC(Ag).

Действия ИА в среде мультиагентного моделирования связываются с определённым поведением, на основе которого ИА формирует свои правила, обрабатывает информацию о состоянии среды в момент времени t и реализует действие, которое изменяет общее состояние системы.

Планирование динамического поведения ИА в мультиагентной среде состоит в выработке правил поведения $\pi(s,a)$ с учётом эволюционного развития всей MMS. После уточнения общей картины ситуации (модели мира) $Q\pi(s,a)$ ИА изменяет своё поведение $\pi(s,a)$ с целью выбора наиболее ценного действия

$$a = \arg\max_{a^*} Q^* \pi(s, a^*) . \tag{3}$$

При этом выбор правил поведения ИА $\pi(s,a)$ формируется из определённого набора наиболее ценных допустимых действий $a$ в состоянии $s$.

Таким образом, технология генерации решений ИА в среде MMS реализуется по типу обратной связи путём изменения поведения $\pi(s,a)$ и соответствующих наиболее ценных действий. Изменение правил поведения ИА отвечает за эффективность его адаптивных действий. Если ситуация не может быть сопоставлена с действиями соответствующего ИА, то требуется расширение области определения нечёткого соответствия агента FC(Ag).

Из вышесказанного следует, что для реализации процедуры динамической адаптации ИА к изменению состояния среды взаимодействия агентов MMS должна обеспечивать работу: в режиме мониторинга ситуации, в режиме оперативного контроля ситуации ИА, а также в режиме поиска альтернативных действий при возникновении ситуации, не сопоставимой с функциональностью ИА, с возможностью расширения области нечёткого соответствия FC(Ag).

Ключевыми аспектами эффективности применения того или иного метода проектирования траекторий в пространстве состояний, являются следующие:

- степень неопределённости состояния обстановки, в рамках которой должен быть найден оптимальный/рациональный путь;
- характер и степень изменчивости ситуации в ходе реализации движения по выбранному пути;
- размерность пространства состояний;
- удалённость до цели и т.п.

Заметим, что в модельных расчётных задачах размер ячейки ценовой матрицы может быть произвольно малым, например, визуально отображаемым одним пикселем на схеме или экране, что позволяет переходить к более наглядному понятию «карты параметра», имеющего аналогию в виде слоёв географических карт.

## Построение траектории в частично известной обстановке

В рассматриваемой интерпретации рассматриваемую задачу можно трактовать следующим образом. Для ИА требуется осуществлять поиск пути в пространстве состояний до точки, удалённой от исходного положения на расстояние, много большее, чем размер зоны, которую ИА может наблюдать. В этом случае при проектировании траекторий достижения целей в пространстве состояний требуются методы решения задачи поиска оптимального пути в частично известной обстановке.

В качестве иллюстрации рассмотрим ситуацию, когда субъект (агент), для которого решается задача поиска оптимального пути, обладает ограниченным радиусом обзора окружающей среды, ему известны направление и расстояние до цели, но сама цель находится от агента существенно дальше радиуса обзора. Агент также обладает памятью об обстановке, им уже изученной. Требуется найти допустимой путь к цели в условиях ограниченного знания об обстановке.

В этой постановке можно предложить следующий алгоритм поиска:

- в пределах обозреваемой зоны строится наиболее короткий путь к точке, имеющий наилучшую оценку как по затратам на её достижение, так и по близости к цели по прямой;
- осуществляется движение по выбранному пути, после которого поле видимости увеличивается и появляется возможность вновь оценить изменившуюся обстановку;
- процедура повторяется, пока не будет достигнута цель или пока не будут исчерпаны все возможности её достижения.

Наглядной иллюстрацией применения этого алгоритма является решение задачи поиска пути выхода из лабиринта. При использовании сложных лабиринтов в качестве модели пространства состояний могут быть выявлены основные достоинства и недостатки применяемых методов.

Для примера на рисунке 4 показаны лабиринт и наилучшая траектория его прохождения из заданной исходной позиции, полученная при условии полного знания обстановки, поэтому она может использоваться для сравнения.

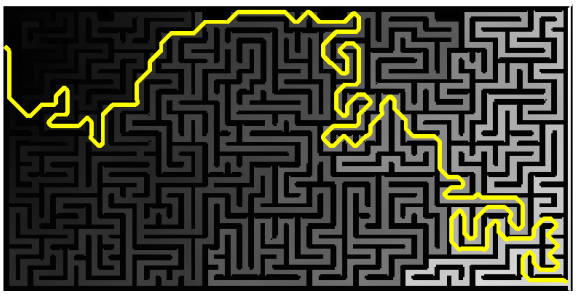


Рис. 4. Пример лабиринта и наилучшая траектория выхода.

Вполне вероятно, что в случае частичного знания обстановки траектория движения к выходу из лабиринта изменится. Один из результатов решения подобной задачи в соответствии с описанным выше алгоритмом на примере того же лабиринта показан на рис. 5.

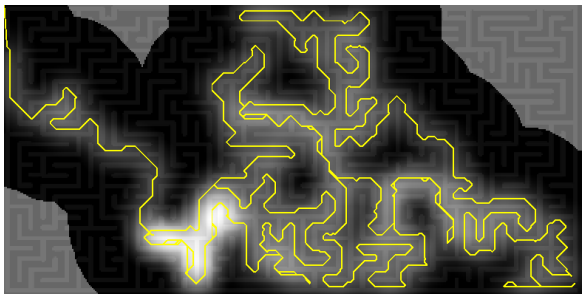


Рис. 5. Траектория выхода из лабиринта при ограниченном поле видимости.

На рисунке изображены реализованная траектория (жёлтый цвет) движения к цели; область вскрытия обстановки в ходе поиска пути, размер которой обусловлен введённым ограничением (тёмная область); светлые пятна – «след», оставленный агентом, – чем светлее область, чем дольше агент в ней находился, пытаясь «выбраться из тупика».

Как ожидалось, полученная в результате траектория существенно отличается от оптимальной. Представленная реализация решения задачи поиска пути в частично известной обстановке базируется на градиентном спуске, причём градиент периодически (в примере – на каждом шаге) перестраивается. Градиент формируется на основе поля «следов» (чем больше следов на определённом участке, тем выше значение штрафа за преодоление этого участка), поля расстояний локальных целевых точек от текущего местоположения и поля прямых расстояний до целевой точки.

Подобный алгоритм поиска в ширину является лишь одним из множества потенциально возможных алгоритмов решения задачи. Потенциально

эффективной модификацией алгоритма может быть замена поиска в ширину на поиск в глубину.

На рис. 6 приведены разные стадии реализации алгоритма поиска в глубину.

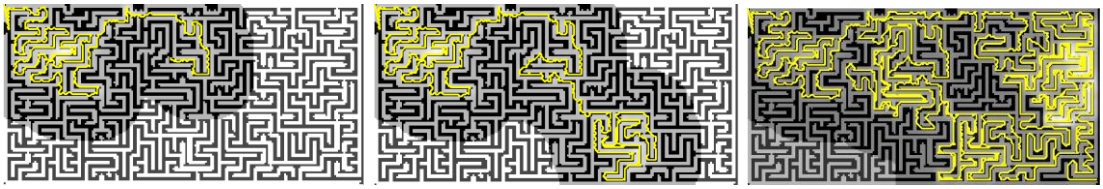


Рис. 6. Разные этапы реализации алгоритма поиска в глубину.

Несмотря на то что в данном примере этот метод оказался менее эффективен, чем предыдущий, но в определённых условиях, как показывает опыт, такая модификация может обеспечить существенное уменьшение объёма вычислений.

Обратим внимание на то, что непременным условием успешного решения задачи поиска пути в условиях неопределённости является такое свойство ИА, как самообучаемость. Здесь это свойство реализуется путём запоминания участков пространства состояний, которые им были исследованы (что выражено в постоянной перестройке градиента на основе получаемой информации). Применённый здесь подход к самообучению является одним из наиболее простых. При рассмотрении других задач механизмы самообучения могут быть значительно усложнены в зависимости от потребностей. Один из таких подходов к поиску рациональных действий на основе самообучения в сложном конфликте описан ниже.

## Способы и примеры описания состояний

Понятно, что вид конфликта и решаемые в процессе моделирования его динамики задачи предопределяют перечень параметров, которыми наиболее целесообразно характеризовать состояния субъектов. Поскольку исходно проводимые исследования были направлены на решение вопросов антитеррористической защиты объектов, то формирование описывающих состояние конфликтующих сторон характеристических параметров логично проводить по аналогии с военным делом. В частности, путём рассмотрения таких обобщённых категорий для оценки положения субъекта противостояния, как «перевес сил», «сильная позиция» и т.п. Очевидно, что именно ориентация на получение и использование превосходства над противником позволяет более гарантировано достигать поставленные цели в конфликте. Пространства состояний субъектов конфликта в интересах анализа области конфликта с позиций преимущества необходимо препарировать для выявления характерных зон, существенным образом влияющих на реализацию этих состояний. С этой целью имеет смысл вводить такие обобщающие характеристические

параметры, которые позволяют оценивать состояние субъекта и возможность достижения поставленных целей.

При моделировании конфликтов различного вида как состав и способы формирования, так и интерпретация таких параметров должны быть увязаны с особенностями решаемой задачи. Подобные характеристики предназначаются для выявления качественных особенностей возможных состояний субъекта, которые учитываются при оценке траекторий достижения цели. Рассчитывая и агрегируя с учётом их важности с этих позиций различные характеристические величины, можно выделить оптимальные с точки зрения субъектов траектории в фазовом пространстве.

Исходная постановка задачи предусматривает оценку вооружённого противоборства на некотором участке местности двух конфликтующих сторон – нарушителя против охраны объекта. Поэтому в числе обобщённых параметров целесообразно рассмотреть такие категории, описывающие пространства состояний субъектов, как проходимость зон, манёвренность, уязвимость, рискованность и другие подобные. Для этого нужно формализовать перечисленные характеристические параметры с позиций решаемых в ходе исследования задач.

**Проходимость**. Этим термином обычно обозначается характеристика пространства, обуславливающая сложность физического перемещения по территории из одной точки в другую. Проходимость участка тем ниже, чем сложнее осуществить переход по нему. На участке могут быть различные элементы рельефа, вплоть до непреодолимых препятствий, затрудняющие движение. Затраты на их преодоление обратно пропорциональны проходимости. Нужно помнить, что проходимость обуславливается свойствами субъекта, например, видом используемых средств передвижения. Так, для одних средств водная преграда может быть труднопреодолимой (автомобиль), для других – не представлять сложности (амфибия). При отсутствии прочих влияющих факторов проходимость становится базовым фактором, лежащим в основе построения рациональных траекторий достижения целей. В общем случае проходимость $\Pi_{(x,y)}$ какой-то точки с координатами *(x,y)* можно выразить через соотношение максимально возможных скоростей преодоления данной точки $v_{\max}(x,y)$ и перемещения в свободном состоянии $v_{\max}$:

$$\Pi_{(x,y)} \sim v_{\max}(x,y) / v_{\max}. \qquad (4)$$

Значения этого параметра могут изменяться в диапазоне от 1 (беспрепятственное движение) до 0 (непроходимые участки). В привязке к территории действий и свойствам субъектов свою ценовую матрицу проходимости можно построить для каждого из них.

**Манёвренность состояния**. Этот параметр позволяет определять степень свободы субъекта, находящегося в определённом состоянии, в выборе

дальнейших путей движения к цели. Здесь можно сослаться на [6], в которой определение локальной манёвренности как характеристики текущего состояния субъекта $\mathfrak{M}_{(x,y)}$ было определено через степень равномерности затрат на достижение соседних состояний. В связи с чем эта величина выражалась через дисперсию затрат на переходы в соседние состояния.

$$\mathfrak{M}_{(x,y)} \sim D_{(x,y)} = \sum_{\eta \in \Delta U(s_{x,y})} \frac{(\eta_l - M[\Delta U(s_{x,y})])^2}{n_{\Delta U}(s_{x,y})}. \qquad (5)$$

Здесь:

$s_{x,y}$ – состояние в точке *(x,y)*;

$\Delta U(s_{x,y})$ – множество затрат, включающих переходы из состояния в точке *(x,y)* в соседние состояния;

$n_{\Delta U}(s_{x,y})$ – количество состояний, смежных с состоянием в точке *(x,y)*;

M[…] – математическое ожидание;

$\eta_l$ – величина затрат перехода в соседнее состояние *l* в рассматриваемой точке.

Из числа возможных рациональных траекторий достижения целевого состояния субъекту конфликта целесообразно выбирать траекторию с наибольшим суммарным значением манёвренности. Важность такого выбора, то есть траекторий с б*о*льшими значениями манёвренности, обусловлена тем, что, с одной стороны, большие значения этого параметра порождают больше неопределённости для противника относительно возможного поведения субъекта в конфликте, затрудняя противодействие, с другой стороны, высокая манёвренность обеспечивает более высокую вероятность решения целевых задач в таких условиях. Для каждого участника конфликта может быть построена своя ценовая карта манёвренности.

**Рискованность состояния**. Этим термином обозначен описывающий текущее состояние субъекта интегральный параметр, отражающий способность противника к такому воздействию на субъект в этом положении, которое способно перевести его в худшее состояние с точки зрения решения его целевых задач. Эта характеристика связана с числом состояний противника, из которых возможно нанесение ущерба определенной тяжести.

Для расчёта этой величины введем потенциал $U^k$ как величину, обозначающую меру способности *k*-го субъекта по достижению его целевого состояния. Любое направленное действие со стороны противника, уменьшающее этот потенциал субъекта, то есть снижающее вероятность достижения цели, считается воздействием на него. Другими словами, противник, находясь в точке с координатами $\overrightarrow{y_j}$, может нанести ущерб размером $dU_{ij}$ субъекту, который находится в точке с координатами $\overrightarrow{x_i}$. При

этом область изменения координат вектора $\overrightarrow{y_j}$ включает диапазон $R$ возможных траекторий источника воздействий в его фазовом пространстве. Совокупная возможность нанесения ущерба будет пропорциональна отношению числа состояний $N(\overrightarrow{y_j})$, из которых может быть причинён ущерб больше некоторого порогового значения $dU_{ij} > dU_{пор}$, к общему числу состояний источника воздействия в диапазоне его возможных траекторий $N(R)$. Величина порогового значения нужна, чтобы исключить ситуации с незначительными ущербами, после которых субъект восстанавливает свой потенциал.

Таким образом, параметр рискованности отражает потенциальную способность одного субъекта воздействовать на другого из всех возможных его положений:

$$\Omega_{(x,y)} \sim \frac{N(\overrightarrow{y_j})}{N(R)} \sum_{y_j \in R} dU_{ij} \ . \qquad (6)$$

Рассматривая все возможные взаимные позиции субъектов, рассчитывая величины воздействий и интегрируя их, можно построить карты рискованности, отражающей распределение возможности воздействия каждого из субъектов на диаграмму состояний его оппонента.

Карта рискованности положений может использоваться субъектами при формирования своей стратегий поведения в конфликте. Стратегия поведения должна предусматривать минимизацию вероятности своего попадания в эти зоны при одновременном повышении такой вероятности для противника.

**Уязвимость.** Это понятие представляется похожим на понятие рискованности, но не идентичным ему. Под уязвимостью текущего положения понимается вероятность снижения потенциала состояния субъекта конфликта при дальнейшем его движении к цели в результате воздействия каких-либо факторов.

Расчёт этой величины в заданном состоянии производится путем определения всех вероятных траекторий, выходящих из рассматриваемого состояния, и изменения потенциалов тех состояний, через которые они проходят, включая конечные. Затем осуществляется суммирование положительной разности потенциалов начального и конечного состояния каждой траектории с учетом вероятности её реализации. Другими словами, степень уязвимости текущего положения $\Psi_{(x,y)}$ связана с вероятностью и размером последующего снижения потенциала субъекта на всех траекториях, проходящих через данное состояние.

$$\Psi_{(x,y)} \sim \sum_{T \in N(R)} \zeta_T \Delta U_T , \qquad (7)$$

где

$\zeta_T$ – вероятность реализации траектории *T* из множества возможных траекторий *N(R)*, исходящих из точки *(x,y)*;

$\Delta U_T$ – суммарная величина снижения потенциала в процессе реализации *T*-ой траектории.

Точка траектории может быть уязвимой даже в ситуации, когда противник не может напрямую воздействовать, но при этом значительная часть выходящих из этой точки наиболее вероятных траекторий приводит к вероятности получения значимого для субъекта ущерба. Карта уязвимостей также может служить одним из оснований формирования стратегий субъектами конфликта, позволяя при планировании своих действий избегать зоны высокой уязвимости. При этом в рамках стратегии поведения в конфликте у каждого субъекта может быть интерес в создании таких условий для своего противника, при которых тот может оказаться в зонах с высокой уязвимостью.

Рассмотренные здесь категории в текущем исследовании являются базовыми для предлагаемого анализа фазовых пространств состояний субъектов конфликта. По такому же принципу можно вводить дополнительные категории характеристики пространства состояний, позволяющие исследовать другие особенности возможного взаимодействия субъектов, что позволяет ещё более сузить область возможных решений при исследовании вероятных областей актуализации конфликта в условиях существенной неопределённости.

Ниже приведены примеры таких дополнительных категорий:

*«степень превосходства состояния»* – соотношение между уровнем ущерба, который может быть нанесён в рассматриваемом состоянии оппоненту, и уровнем ущерба, который может нанести субъекту его оппонент. Карты превосходства состояний позволяют выстроить траектории через зоны предпочтительных положений вплоть до точек «абсолютного превосходства», отражающих те состояния, в которых субъект, оставаясь недосягаемым для воздействия со стороны противника, имеет возможность нанести ему существенный ущерб.

*«значимость состояния»* – суммарная величина ценности всех рациональных траекторий, проходящих через это состояние. Под ценностью понимается величина, обратная величине средних затрат на реализацию этих траекторий. Выделение значимых состояний априори выстраивает оптимальную траекторию движения к цели;

*«могущество состояния»* – суммарная величина, отражающая возможность воздействия субъекта из своего текущего состояния на все пространство состояний оппонента. Значения этого параметра можно рассчитать, определяя суммарные потери потенциала оппонента в различных состояниях с учётом вероятности его нахождения в этих состояниях от воздействий субъекта. Карта могущества позволяет выделить зоны, которые можно считать благоприятными для эффективного воздействия на противника.

Очевидно, что такой список может быть расширен и модифицирован с учётом решаемых задач. Априорное выделение в фазовых пространствах противоборствующих сторон характерных зон, отличающихся с точки зрения выполнения их задач положительными или отрицательными свойствами, позволяет значительно уменьшить объем анализируемых ситуаций при моделировании развития конфликта, выделить области возможных решений и за счёт этого повысить оперативность выработки решений для адекватного реагирования в неочевидных ситуациях. Последнее имеет чрезвычайно большое значение для успешных действий в скоротечных конфликтах.

## Пример решения модельной задачи

Одним из важнейших аспектов, которые существенно влияют на адекватность моделирования возможных вариантов протекания конфликта, является учёт взаимной зависимости противников друг от друга. Успешное достижение поставленной цели предполагает адекватный учёт изменения ситуации, связанного с действиями оппонента, то есть решения и действия каждого из противников должны быть ситуативны по своей содержательной сути. Соответственно, траектории достижения целей различными участниками естественным образом связаны друг с другом. В обычных условиях это связано с проявлением феномена рефлексии высоких порядков.

По этой причине для анализа в пространстве состояний необходимо рассматривать не исключительно индивидуальные, а взаимозависимые траектории достижения целей участниками конфликта. Если исходить из предположения, что каждый из противников действует по мере возможностей оптимально, то взаимное положение их траекторий будет отражать такое поведение, когда любое отклонение от оптимальной стратегии одним из участников может привести к увеличению прежде всего его собственных потерь. В математике такое равновесие называется равновесием Нэша.

Поиск равновесия системы взаимосвязанных траекторий является сложной задачей, для решения которой могут использоваться различные методы. В настоящей работе применяется метод коэволюции как разновидность итерационного подхода.

Для иллюстрации используемого алгоритма был взят абстрактный модельный пример с данными, обеспечивающими наглядность демонстрации основных технологических процедур.

**Формулировка задачи**. Опишем постановку этой абстрактной задачи. Как обычно, постановка задачи предполагает описание исходных данных, принятых условий и ограничений. В данном случае в качестве исходных используются следующие предпосылки:

- модель препятствий для перемещения (с выделением непреодолимых для субъектов в ходе движения зон);

- модель препятствий для обнаружения и воздействия (загораживающие элементы);
- модель усложнённой проходимости участков (проходимость рельефа);
- модели силового воздействия противников друг на друга;
- точки исходного положения противников;
- точки целевого назначения противников.

Первые три модели введены в форме особенностей рельефа обстановки на территории взаимодействия субъектов и являются одинаковыми для обеих сторон. Модели воздействий асимметричны с позиции достижимости друг друга, причём величина наносимого ущерба уменьшается с увеличением расстояния, однако в суммарном проявлении по площади пространства размеры наносимого ущерба одинаковы для обоих участников. Точки исходного и целевого положения противников, расстояния между которыми также одинаковы, расположены на пересекающихся диагоналях области их взаимодействия. Скорости перемещения противников также принимаются равными.

Задачей каждого из противников является достижение целевого положения в кратчайшие сроки с наименьшими потерями при одновременном нанесении максимального ущерба противнику. Срок прохождения маршрута также важен, поскольку одним из условий является уменьшение потенциала с течением времени (нельзя «отсидеться» в безопасном месте).

Как уже отмечено, первые три модели из перечисленных в постановке задачи представлены одной ценовой картой, которая отображена на рис. 7.

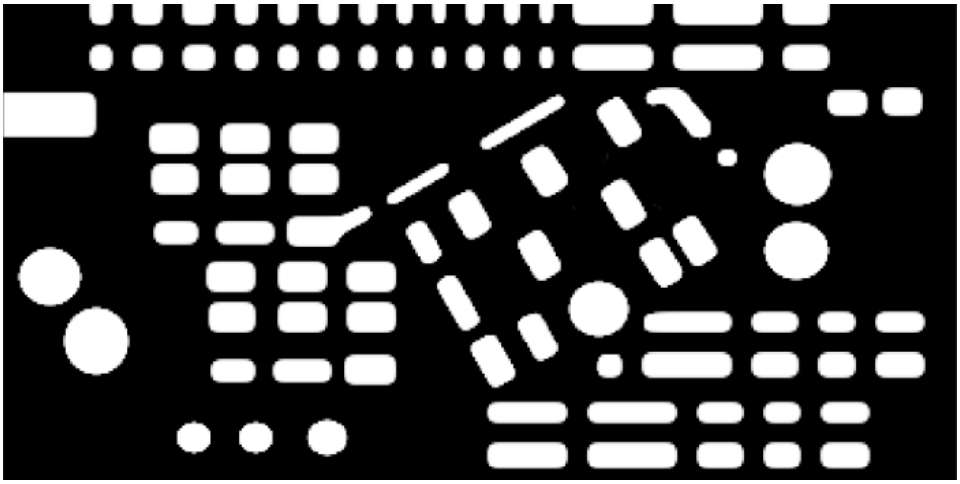


Рис. 7. Исходная модель препятствий.

На рис.7 светлым отображены состояния, попасть в которые субъекты не могут – эти участки считаются непреодолимыми. В реальной обстановке это могут быть существующие здания и сооружения в границах обстановки. Субъекты могут перемещаться только между ними. Эти же участки являются препятствиями для средств обнаружения и воздействий субъектов друг на

друга. Для усложнения в модель исходной обстановки добавлены элементы рельефа с пониженной проходимостью, которые в модели отображаются в виде дополнительных затрат на преодоление каких-то участков.

Как уже подчёркнуто в условиях задачи, в рассматриваемом примере используется единая ценовая матрица условий обстановки для обоих противников. При решении реальных задач, как правило, приходится учитывать, что стороны обладают различными возможностями перемещения в пространстве, и вводить разные матрицы. Сводная матрица проходимости с отображением препятствий, соответствующая затратам на преодоление участков пространства, отображена на рис. 8.

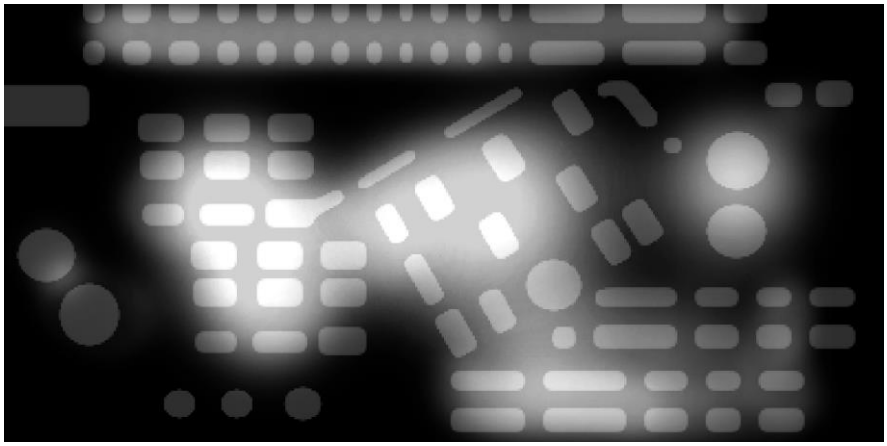


Рис. 8. Интегральная модель затрат на преодоление участков пространства.

На приведённой иллюстрации (рис. 8) белым показаны участки абсолютной непроходимости, а градиентом серого – затраты на перемещение по территории (по принципу: чем светлее участок, тем больше затрат).

Воздействия каждого из участников на своего оппонента представлены в форме модели досягаемости пространства из заданного положения.

В заданном абстрактном примере принята асимметричная модель воздействий, то есть предполагается, что возможности противников в воздействии друг на друга отличаются. Противник А имеет возможность воздействия на противника Б только в границах прямой видимости, а противник Б может воздействовать на противника А только по баллистической траектории. Проявление асимметрии демонстрируется схемой на рис. 9.

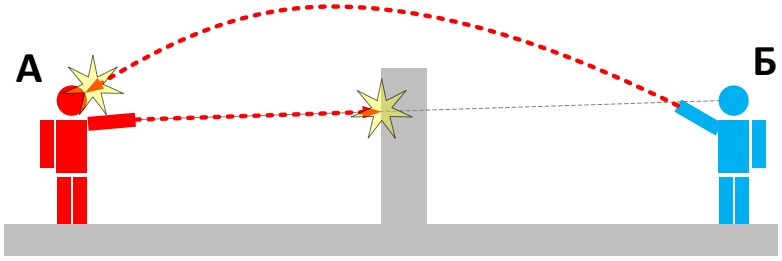
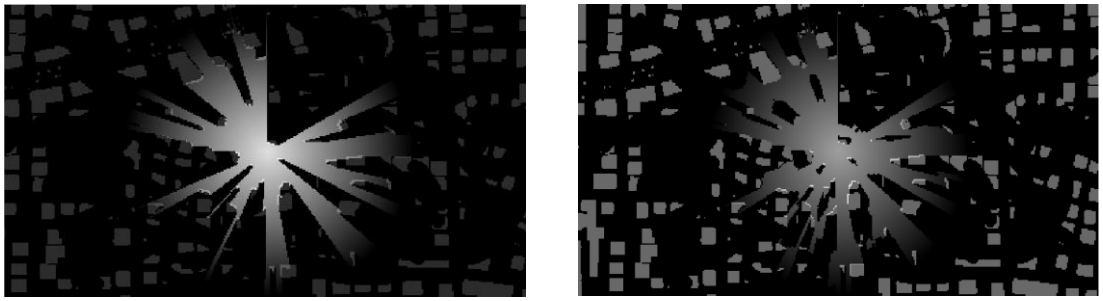



Рис. 9. Модель асимметричного воздействия сторон

В связи с различием в характеристиках средств воздействия друг на друга для каждого из участников должна быть сформирована своя карта возможностей поражения противника. Расчёт соответствующих зон воздействия на противника из одной и той же точки для каждого из субъектов приведён на рис. 10.

При сопоставлении полученных расчётных карт, на которых интенсивность воздействия показана тональностью серого цвета, можно заметить на рис. 10*б)* более короткие тени «недоступности», что связано с характером баллистического воздействия, а также несколько более слабую засветку в непосредственной близости к источнику, которая обусловлена требованием равенства суммарного воздействия каждого из субъектов на противника.



*а) Противник А* *б) Противник Б*

Рис. 10. Асимметрия зон поражения противников

Исходные и конечные положения сторон представлены в виде точек на той же ценовой матрице обстановки. Положения этих точек отображены на рис. 11 в форме стрелок, начало каждой из которых показывает исходное положение оппонентов, а конец – конечное целевое состояние.

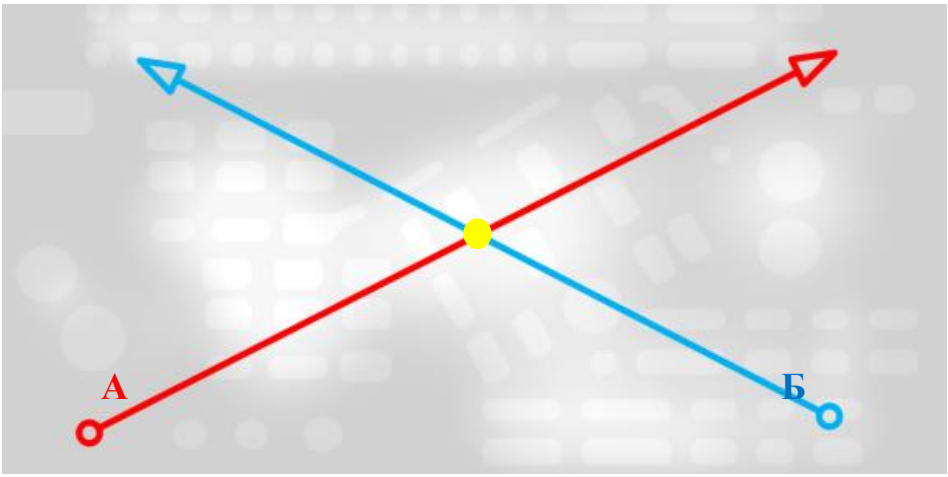



Рис. 11. Исходное и целевое положение противников на карте обстановки.

**Результаты численного моделирования.** Для начала найдём оптимальную индивидуальную траекторию для каждого из участников в сформированных исходными данными условиях обстановки без учёта их конфликтного противоборства, то есть без учёта необходимости «оглядываться на противника» и «сражаться» с ним. При такой формулировке траектория движения будет определяться только фактором затрат на преодоление пути с учётом рельефа и препятствий. Фактически необходимо решить оптимизационную задачу поиска пути с минимальными затратами на ценовой матрице, представляющей собой карту проходимости. Полученные в ходе решения такой задачи траектории субъектов представлены на рис. 12. Решение оптимизационной задачи осуществляется с применением генетического алгоритма, как одного из универсальных для подобных условий, в связи с чем найденное решение можно считать квазиоптимальным. Вычислительный процесс поиска минимума функционала затрат прекращается после достижения относительно стабильных значений искомого функционала в течение некоторого определённого количества итераций.

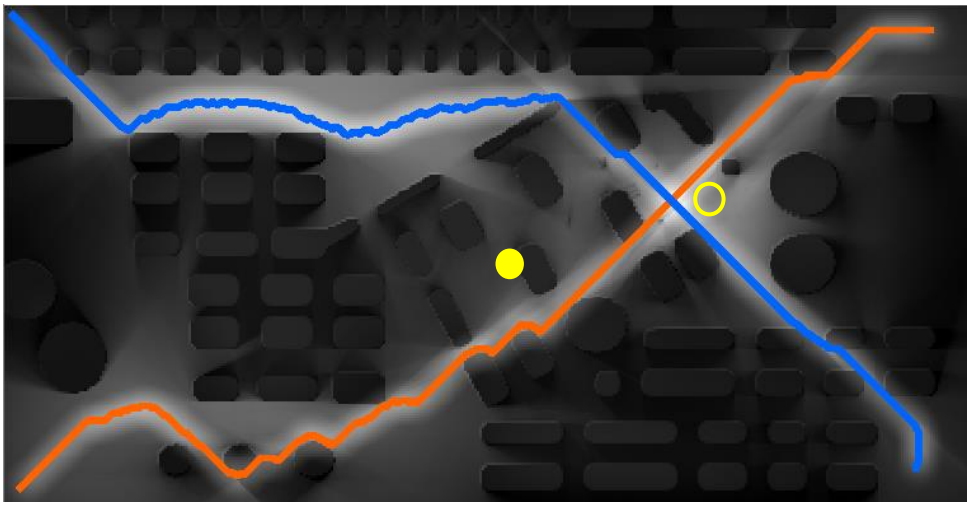


Рис. 12. Решение задачи поиска оптимального пути для каждого участника.

На этих же рисунках с помощью тональности серого цвета выделены возможности воздействия каждого из противников на окружающее их пространство. Значительное отклонение траекторий обоих субъектов от точки пересечения направлений их движения, находящейся в центре области действия, связано с необходимостью обхода зоны больших затрат на преодоление препятствий рельефа. Точка пересечения траекторий субъектов А и Б при их «спокойном», то есть неконфликтном поведении, отмечена кольцевым кружком.

Проявление взаимосвязанности траекторий в случае противодействия сторон исследовалось на втором этапе решения задачи, на котором также осуществляется поиск рациональной траектории каждого из участников, но уже с учётом возможности взаимного нанесения ущерба.

Как уже отмечено, на этом этапе используется коэволюционный алгоритм, в рамках которого производится итерационное улучшение искомого решения. В рассматриваемом расчётном примере были применены следующие условия для остановки итерационного процесса. В качестве нижней границы задано, что количество итераций на каждом шаге не должно быть менее 50. Условием для остановки является выход решения на некоторую «стационарную площадку», когда в течение множества итераций подряд (число которых составляет 10% от общего числа сделанных итераций, включая 50 исходных) результат существенно не улучшается.

Процесс вычислений включает следующие последовательно выполняемые процедуры:

1. Вводятся матрицы исходных данных, описывающие условия обстановки (модель местности).
2. Задаётся первичное приближение траекторий движения субъектов из исходного положения в целевое с учётом обстановки. В рассматриваемом примере в качестве исходных были приняты траектории движения в неконфликтной среде, полученные на первом этапе.
3. Для каждого из участников формируются временные динамические матрицы его воздействия на окружающую обстановку из точек текущей траектории.
4. Данные из сформированной модели воздействия на окружающую обстановку добавляются к интегральной модели воздействия каждого участника.
5. Проводится корректировка пути субъекта А на основании имеющейся модели местности и интегральной модели воздействия на неё субъекта Б; причём оптимизация проводится по критерию минимизации затрат субъекта А на преодоление пути с учётом дополнительных потерь от воздействий противника.
6. Проводится корректировка пути субъекта Б на основании имеющейся модели местности и интегральной модели воздействия на неё субъекта А на тех же условиях, что и в п. 5, то есть оптимизация проводится по критерию минимизации затрат субъекта Б на преодоление пути с учётом возможных потерь от воздействий противника.
7. Производится перерасчёт динамических матриц воздействия на текущую обстановку для каждого из участников с учётом их скорректированных траекторий.
8. Проверяется соблюдение условий достаточности для прекращения вычислений по данному варианту (по числу итераций, по относительной величине разности размера затрат каждого из участников на текущем и предыдущем шаге, по количеству низких значений этих разностей).
9. Возврат на шаг 4 при несоблюдении любого из обозначенных условий достаточности.

Смысл введения наряду с временной динамической матрицей матрицы интегральной модели воздействий заключается в устранении циклических возвратов на предыдущий уровень. На первом шаге значения в интегральной модели совпадают со значениями временной динамической матрицы, в последующем происходит накопление величин за счёт прибавления к предыдущим значениям интегральной матрицы значений временной динамической матрицы на текущем шаге.

Полученные в результате ряда вычислительных экспериментов варианты решений в виде пучков траекторий, удовлетворяющих сформулированным требованиям, приведены на рис. 13. Эти результаты представляют собой результаты решения задачи поиска квазиоптимальных взаимосвязанных траекторий для двух противоборствующих субъектов с асимметричной схемой воздействий друг на друга, действующих в одинаковых условиях обстановки.

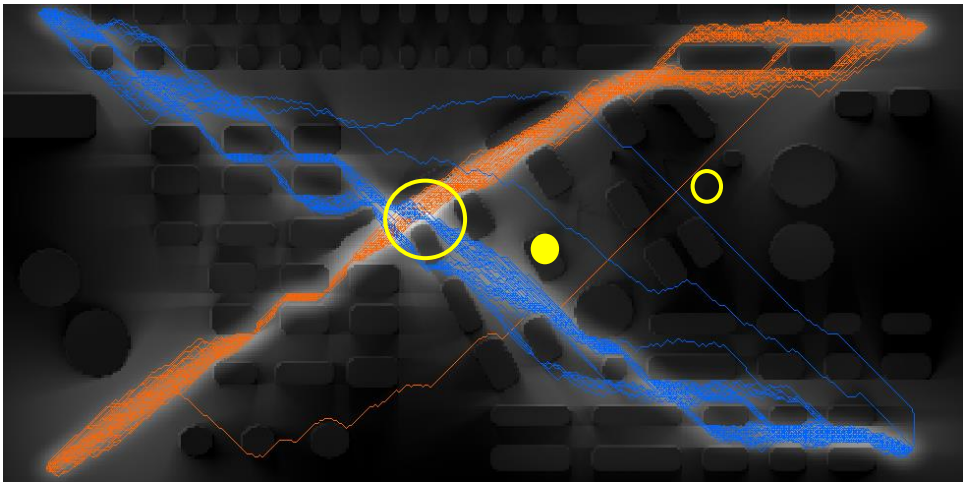


Рис. 13. Решение задачи поиска оптимальных взаимосвязанных траекторий.

На приведённой иллюстрации отчётливо проявляется эффект взаимозависимости траекторий. При сопоставлении с представленными на рис. 12 полученных расчётных кривых рис. 13 можно видеть значительное смещение последних относительно индивидуально оптимальных траекторий, которые для наглядности также представлены на рис. 13. В частности, зона пересечения зависимых траекторий (левое кольцо на рис. 13) находится на существенном удалении от зоны пересечения независимых (правое кольцо на рис. 13). Здесь же можно видеть, что взаимозависимые траектории сместились ближе к центру, несмотря на наличие там зон «сложной проходимости». То есть воздействие противника оказывается более значимым фактором для выбора пути, чем условия рельефа.

Ввиду особенностей применяемого для поиска рациональных траекторий алгоритма, то есть определения их взаимного расположения в каждый момент времени на основе критерия минимизации потерь на достижение целевого состояния каждым из противников в условиях противоборства, можно

утверждать, что полученный результат отражает равновесие Нэша для данной задачи, поскольку любое изменение своей траектории любым из участников будет приводить к увеличению его собственных затрат на достижение целевого состояния.

## Адаптация правил поведения

В фазовом пространстве или в пространстве состояний определим некоторую произвольную точку, которую будем считать за начальное положение субъекта. Также зададим и вторую точку, обозначающую положение цели. Состояний субъекта изменяется в результате совершения некоторых элементарных действий в пространстве состояний, при этом набор возможных действий ограничен и описывается набором правил поведения, каждое из которых отображается вектором в фазовом пространстве. Последовательное пошаговое совершение действий формирует некоторую траекторию субъекта в пространстве состояний. Возникает вопрос: возможно ли формирования рациональной стратегии поведения в зависимости от исходного и целевого состояния субъекта, особенностей модели мира, отображённой в пространстве состояний и обусловленной допустимым набором правил поведения и возможных действий.

В двумерной интерпретации поставленная задача схематически отображена на рис. 14.

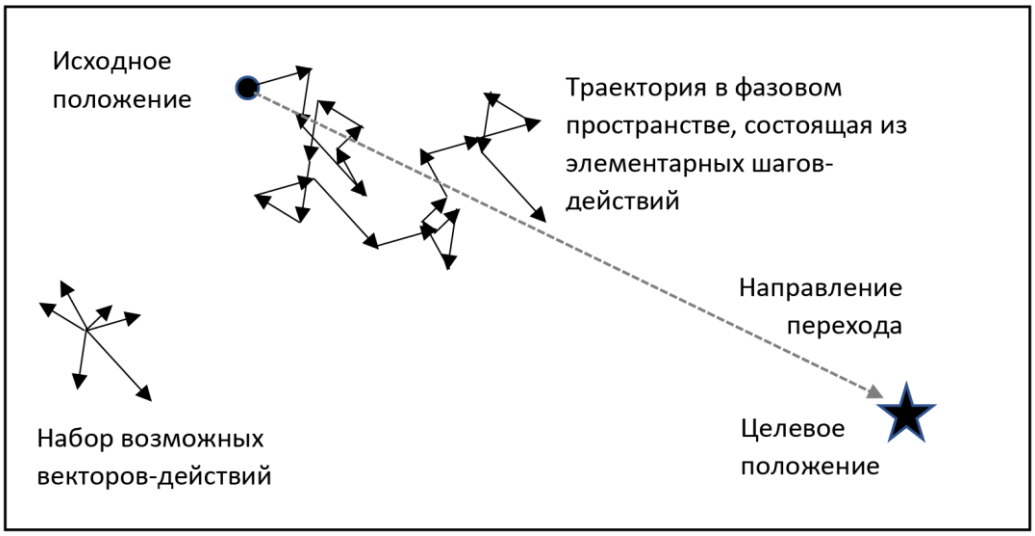



Рис. 14. Схематическое представление задачи.

Кратчайшее направление или траектория из исходного в целевое состояние показана пунктирной линией. Очевидно, что результат реализации того или иного правила поведения, которое в фазовом пространстве отображается некоторым вектором-действия, вряд ли будет совпадать с кратчайшим направлением. Очевидно, что рациональная траектория перемещения должна быть как можно ближе к этой линии. Но в условиях неточной информации «о

качестве» каждого из векторов её построить сложно. Для двумерной задачи, представленной на рис. 14, такую операцию можно проделать «вручную», исходя из визуальных оценок. Одним из возможных результатов могут быть, например, варианты траекторий, показанные на рис. 15.

В обсуждаемой постановке задачи выделены только три известных априори элемента: исходное и целевое положения субъекта и набор его возможных действий, который может быть достаточно широким. Остаётся неизвестным, какие из действий, а тем более – в какой последовательности, наиболее быстро приведут к нужному результату.

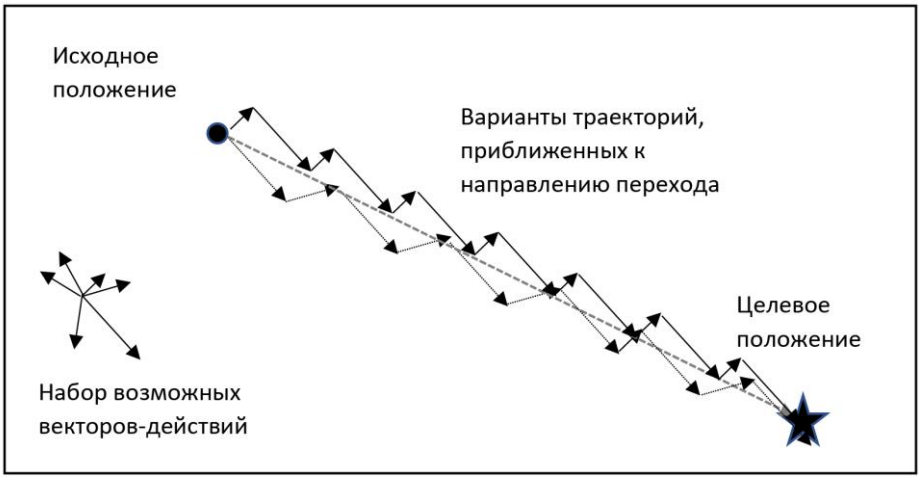



Рис. 15. Схематический пример построения рациональных траекторий «вручную».

В представленном схематическом примере исходя из визуальной оценки набора векторов-действий такие траектории можно построить «вручную». Возможны как минимум два рациональных варианта траекторий перехода из исходного состояния в целевое, при этом достаточно использовать комбинацию всего двух из всех возможных действий. При сравнении полученных траекторий можно видеть, что верхняя чуть более предпочтительна по степени приближения к целевому положению, но на её реализацию требуется на один шаг больше. Чтобы определить лучшую из них, необходимы дополнительные критерии оценки, например, сравнение критериев по точности и затратам ресурсов.

На основе выше рассмотренных примеров можно утверждать, что в многомерном фазовом пространстве построение оптимального пути возможно только при условии полного знания обстановки: откуда, куда, какими средствами, с какими промежуточными результатами могут реализоваться те или иные действия, вытекающие из правил поведения агентов.

Для условий неопределённости необходимо разработать механизм адаптации ИА к динамической обстановке и формирования рационального

набора правил поведения, которые позволят ему принимать рациональные решения при движении к цели в фазовом пространстве состояний. Создание такой методологии позволит в дальнейшем для различных видов конфликтов разрабатывать модель электронного полигона в форме MMS и исследовать с помощью мультиагентного моделирования наиболее рациональные стратегии поведения, а также формировать упорядоченное множество наиболее эффективных правил поведения и соответствующих действий в различных условиях обстановки.

Была предложена и апробирована следующая схема. Задаются многомерное фазовое пространство и неупорядоченное множество допустимых действий. При этом, количество действий и размерность пространства определяются условиями конкретной задачи.

Предполагается, что основой для принятия решений агентом в текущей обстановке на выбор конкретного действия служит некоторая априорная оценка ценности тех или иных действий. Вначале может быть задана экспертами.

Дальнейшее уточнение оценки действий, которые должен осуществлять агент, является результатом широкой серии численных экспериментов, в каждом из которых строится траектория движения в фазовом пространстве состояний агента от исходного к целевому. В процессе выполнения вычислений каждому совершенному действию приписывается определённый рейтинг. Рейтинг каждого действия определяется по степени приближения нового состояния к целевому состоянию, полученного в результате осуществления этого действия из данного положения. При положительном эффекте (приближение к цели) вводится поощрение, при отрицательном (удаление от цели) – штраф. В начале расчёта все рейтинги полагаются равными нулю.

Очередной шаг перемещения выбирается случайным образом из списка всех возможных действий, но с учётом их рейтинга. Вероятность выбора действий повышается пропорционально рейтингу. В результате вычислений первоначально равномерное распределение рейтинга действий постепенно деформируется в сторону растущих рейтингов.

На каждой итерации запоминается текущее состояние, в котором находился субъект. Таким образом формируется макет стереотипных ситуаций, в которых эффекты одних и тех же действий могут проявляться по-разному. Например, если ИА находится справа от цели, то действия, уводящие его вправо, будут удалять от цели. Если же ИА находится слева от цели, то роль тех же действий будет противоположной – приближающей к цели.

Каждая итерация прекращается после достижения целевого состояния либо после выполнения априори заданного числа шагов. При этом предельное число шагов определяется как *O*-большое от соотношения средней длины векторов-действий к расстоянию между исходным и целевым состоянием.

На каждой следующей итерации накопленные в предыдущих экспериментах значения рейтингов сохраняются и используются при выборе действий. Таким образом происходит накопление базы знаний и «обучение»

условного агента рациональному выбору действий в зависимости от положения в пространстве состояний, в котором он находится.

Проверка методики проводилась на произвольном примере в пространстве 12 измерений при общем количестве правил поведения, равном 50 (рис. 16). На рисунке показаны 33 действия из 50 в 12-мерном пространстве состояний. Случайным образом в виде векторов в фазовом пространстве выбирались позиции исходного и целевого состояний. Также в форме приращений векторов произвольным образом задавались вектора-действия.

| Name | a1 | a2 | a3 | a4 | a5 | a6 | a7 | a8 | a9 | a10 | a11 | a12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,07 | -0,45 | 0,29 | -0,27 | 0,26 | -0,04 | 0,47 | 0,3 | 0,2 | 0,12 | -0,22 | 0,15 |
| 2 | 0,11 | -0,38 | 0,52 | 0,82 | -0,5 | -0,83 | 0,17 | 0,63 | -0,66 | 0,29 | -0,2 | 0,04 |
| 3 | 0,55 | 0,13 | -0,5 | -0,07 | -0,14 | -0,09 | 0,19 | 0,71 | 0,62 | -0,44 | -0,64 | 0,41 |
| 4 | 0,32 | -0,06 | -0,33 | -0,3 | -0,04 | -0,24 | -0,34 | 0,18 | -0,09 | -0,23 | 0,3 | 0,61 |
| 5 | -0,19 | 0,23 | 0,35 | 0,48 | 0,74 | -0,73 | -0,08 | 0,27 | -0,29 | -0,18 | -0,6 | -0,37 |
| 6 | -0,71 | 0,06 | 0,07 | 0,03 | 0,37 | 0,03 | 0,42 | 0,03 | 0,47 | -0,78 | 0,21 | -0,55 |
| 7 | -0,5 | -0,46 | 0,43 | -0,34 | 0,39 | 0,15 | 0,28 | 0,04 | 0,05 | -0,08 | -0,06 | 0,39 |
| 8 | 0,17 | -0,1 | 0,23 | -0,37 | 0,2 | -0,31 | 0,04 | 0,97 | 0,03 | -0,36 | -0,14 | -0,07 |
| 9 | 0,21 | -0,05 | 0,22 | -0,07 | 0,51 | -0,2 | 0,01 | 0,37 | 0,31 | 0,47 | 0,64 | 0,12 |
| 10 | 0,21 | -0,56 | -0,66 | -0,49 | -0,38 | 0,55 | -0,64 | 0,09 | 0,31 | 0,23 | -0,01 | -0,19 |
| 11 | -0,67 | -0,25 | 0,15 | -0,56 | -0,29 | 0,2 | 0,89 | 0,15 | -0,29 | 0,53 | -0,41 | 0 |
| 12 | 0,16 | -0,21 | -0,02 | -0,2 | 0,18 | 0,27 | -0,46 | 0,34 | 0,17 | 0,5 | 0,8 | -0,17 |
| 13 | 0,26 | -0,18 | 0,26 | -0,53 | 0,24 | -0,08 | -0,5 | 0,11 | -0,64 | 0,41 | -0,1 | -0,55 |
| 14 | -0,3 | -0,04 | 0,61 | 0,4 | 0,09 | -0,31 | -0,08 | 0,25 | -0,04 | 0,02 | -0,35 | 0,01 |
| 15 | -0,14 | -0,52 | 0,09 | -0,38 | 0,74 | 0,11 | -0,1 | 0,95 | 0,21 | -0,48 | 0,1 | 0,48 |
| 16 | -0,14 | 0,03 | -0,47 | 0,05 | 0,42 | 0,3 | 0 | -0,2 | 0,5 | 0,09 | 0,18 | 0,24 |
| 17 | -0,38 | -0,17 | 0,56 | 0,38 | -0,05 | 0,48 | -0,92 | 0,08 | 0,26 | -0,35 | -0,12 | -0,11 |
| 18 | 0,8 | 0,47 | 0,12 | -0,47 | 0,76 | -0,41 | 0,35 | 0,13 | 0,15 | -0,31 | -0,35 | 0,55 |
| 19 | 0,16 | 0,26 | 0,56 | -0,2 | -0,49 | 0,4 | 0,38 | -0,14 | -0,61 | 0,04 | -0,33 | 0,06 |
| 20 | -0,42 | -0,39 | -0,69 | 0,06 | -0,6 | -0,1 | -0,13 | -0,54 | -0,12 | -0,36 | 0,06 | 0,41 |
| 21 | -0,56 | -0,46 | 0,33 | 0,88 | -0,63 | 0,19 | 0,04 | -0,11 | 0,01 | -0,42 | -0,4 | -0,99 |
| 22 | 0,01 | -0,42 | 0,57 | -0,85 | 0,45 | 0,21 | -0,09 | -0,12 | -0,35 | 0,01 | -0,72 | 0,62 |
| 23 | -0,14 | -0,22 | 0,35 | -0,16 | 0,51 | -0,26 | -0,02 | 0,32 | 0 | -0,65 | -0,12 | -0,22 |
| 24 | 0,13 | -0,77 | 0,7 | -0,2 | 0,53 | 0,34 | -0,1 | -0,01 | -0,91 | 0 | -0,14 | 0,64 |
| 25 | 0,1 | -0,36 | 0,36 | 0,91 | -0,2 | -0,46 | 0,14 | 0,6 | 0,65 | -0,1 | 0,44 | 0,53 |
| 26 | -0,22 | -0,2 | 0,53 | 0,51 | -0,36 | -0,13 | 0,32 | 0,5 | 0 | 0,19 | -0,59 | -0,11 |
| 27 | 0,38 | -0,07 | -0,2 | -0,7 | 0,17 | 0,3 | 0,13 | -0,55 | -0,39 | -0,5 | -0,56 | -0,08 |
| 28 | 0,01 | 0,54 | -0,32 | 0,75 | -0,7 | -0,81 | -0,42 | 0,64 | -0,25 | 0,35 | -0,03 | 0,09 |
| 29 | 0,07 | -0,45 | -0,13 | 0,14 | 0,56 | 0,69 | -0,28 | 0,13 | 0,14 | -0,75 | -0,3 | 0,89 |
| 30 | 0,11 | -0,15 | 0,53 | 0,03 | 0,08 | 0,64 | 0,14 | 0,42 | 0,76 | 0,47 | -0,36 | 0,02 |
| 31 | -0,31 | -0,32 | -0,05 | 0,21 | 0,04 | -0,43 | 0,15 | 0,18 | 0,5 | -0,81 | -0,16 | -0,51 |
| 32 | 0,41 | 0,31 | -0,48 | 0,78 | 0,12 | 0,01 | 0,12 | 0,38 | -0,4 | -0,69 | -0,82 | -0,31 |
| 33 | 0,59 | 0,19 | 0,05 | 0,48 | 0,12 | -0,8 | -0,62 | 0,23 | 0,1 | 0,91 | -0,19 | -0,07 |

Рис. 16. Множество допустимых действий.

На рис. 17 представлен результат вычислительной процедуры поиска рациональной траектории.

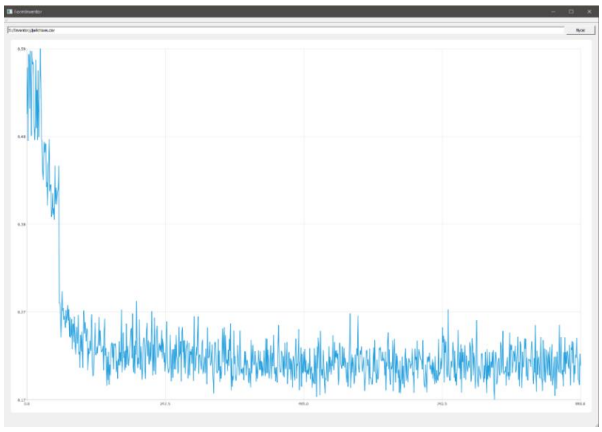


Рис. 17. Результаты процесса «обучения» агента.

Виден процесс качественного улучшения процедуры выбора рациональных действий из заданного множества. На рисунке по оси абсцисс

отложено количество экспериментов, в каждом из которых строится ограниченная по числу шагов траектория движения в фазовом пространстве, по оси ординат – удалённость от целевого состояния в принятой метрике. В каждой итерации агентом учитывается накапливаемый рейтинг векторов-действий с учётом его положения в фазовом пространстве. Из приведённого рисунка видно, что процесс обучения агента приводит к достижению некоторого не улучшаемого уровня результативности, который, однако, позволяет достаточно близко приблизиться к целевому состоянию.

Данная технология, по мнению авторов, показала свою эффективность на тестовых задачах и может быть рекомендована для использования в составе электронного полигона для проверки её возможностей по выработке стратегий поведения агентов в условиях неопределённости в ходе их взаимодействия.

## Заключение

Технологический базис моделирования поведения интеллектуальных агентов предоставляет достаточно широкую основу для исследования особенностей построения траекторий достижения целей в фазовом пространстве и адаптивного поведения агентов в конфликтной ситуации. В силу специфики задач предлагается создавать методы и инструменты математического моделирования фазового пространства состояний конфликтной среды, позволяющие определять стратегии рациональных траекторий достижения цели, а также методики формирования специального функционала адаптации поведения интеллектуального агента как искусственного объекта в динамической среде конфликтного взаимодействия, поведение которого во многих существенных аспектах должно соответствовать поведению человека или организации.

В основе технологии моделирования сложного поведения агентов лежит детальное описание их поведения на основе схемы интеллектуальных переходов между состояниями и моделями поведения, формирование на их базе более сложных конструкций, позволяющих описывать ситуативно адаптивное поведение агентов, когда результатом оптимальной стратегии сторон будет достижение равновесия по Нэшу.

Такая детальность описания сложных моделей поведения позволяет единообразно отображать в модели конфликтной среды существенные аспекты поведения объектов-прототипов реального мира.

Предлагаемая схема обеспечения адаптивного поведения агентов в конфликтной среде является составной частью методического и алгоритмического обеспечения электронного полигона для исследования конфликтного взаимодействия сложных систем.

## Библиографический список


1. Нечаев Ю.И., Осипов В.П. Моделирование эволюционной динамики неоконфликтных систем на основе суперкомпьютерной платформы // Материалы XII международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), 24 - 31 мая 2018 г., Алуште. – М.: Изд-во МАИ, 2018.- 626-629. URL: http://www.npnj.ru/files/npnj2018_web.pdf
2. Балута В.И., Осипов В.П., Яковенко О.Ю. Инструментальная среда поддержки долгосрочного планирования / Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): труды Девятой международной конференции, 03-05 окт.2016, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, т.2. -М.: - 219-226 с.
3. Балута В.И., Нечаев Ю.И., Осипов В.П., Четверушкин Б.Н. Концептуальный базис суперкомпьютерной платформы прикладного моделирования, прогнозирования и экспертиз конфликтного взаимодействия // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2017. № 28, 20 с. doi:10.20948/prepr-2017-28
4. Осипов В.П., Четверушкин Б.Н., Балута В.И., Нечаев Ю.И. Формальный аппарат моделирования и интерпретации антагонистических конфликтов на базе электронного полигона // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. No 181. 28 с. doi:10.20948/prepr-2018-181. ISSN 2071-2898 (Print), ISSN 2071-2901 (Online). URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-181
5. Четверушкин Б.Н., Осипов В.П., Балута В.И. Подходы к моделированию последствий принятия решений в условиях противодействия // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018, №43, 15 с., doi: 10.20948/prepr-2018-43, ISSN 2071-2898 (Print), ISSN 2071-2901 (Online) URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-43
6. Балута В.И., Нечаев Ю.И., Осипов В.П. Вопросы моделирования конфликтного взаимодействия больших динамических систем в условиях высокой неопределённости / Материалы XX Юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017), 24-31 мая 2017 мая 2017 г., Алушта._М.: Изд-во МАИ.2017.- 40-42 с. ISBN 978-5-4316-0401-0
7. Балута В.И., Осипов В.П., Четверушкин Б.Н., Яковенко О.Ю. Концептуальные вопросы модельного представления конфликтов. Труды Международной научной конференции. Нижний Новгород, 2019, Издательство: НГАСУ, НИЦ ФТИ, стр. 27-39 (ISBN: 978-5-6042891-0-5; eLIBRARY ID: 37945882).

8. Нечаев Ю.И., Лютин А.В. Интеллектуальная система, функционирующая на основе мультиагентных технологий // Искусственный интеллект. №3. 2009, с. 413 – 422.
9. Осипов В.П., Четверушкин Б.Н., Нечаев Ю.И., Балута В.И. Онтологический синтез управленческих решений в условиях антагонистических конфликтов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. No 179. 28 с. doi:10.20948/prepr-2018-179; URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-179
10. Александров В.А., Балута В.И., Варыханов С.С., Карандеев А.А., Роднин Я.В. Моделирование антагонистических конфликтов в парадигме кибернетики третьего порядка // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018, 086, 22 с., doi: 10.20948/prepr-2018-86, URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-86, ISSN 2071-2898 (Print), ISSN 2071-2901 (Online) (ВАК, РИНЦ).
11. Четверушкин Б.Н., Осипов В.П., Балута В.И., Яковенко О.Ю. Суперкомпьютерное моделирование в задачах обеспечения антитеррористической безопасности объектов. Труды Международной научной конференции. Нижний Новгород, 2019, Издательство: НГАСУ, НИЦ ФТИ, стр. 40-49. (ISBN: 978-5-6042891-0-5; eLIBRARY ID: 37945604).
12. Олейник А.С. Методы оценки эффективности защиты критически важных объектов // Вестник Московского университета МВД России. 2017 г. №4. с. 280-286. https://cyberleninka.ru/article/n/metody-otsenki-effektivnosti-zaschity-kriticheski-vazhnyh-obektov
13. Вишнякова Т.О., Васильев В.И. Анализ эффективности систем физической защиты при помощи марковской сетевой модели // Вестник УГАТУ, т.9, №7(25), с. 11-19.
14. Боровский А.С., Тарасов А.Д. Интегрированный подход к разработке общей модели функционирования систем физической защиты объектов // Методы и модели системного анализа. Труды ИСА РАН. Том 61. 1/2011. с. 3-13.
15. Степанов Б.П., Годовых А.В. Основы проектирования систем физической защиты ядерных объектов: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
16. Скрыль С.В., Душкин А.В., Гайфулин В.В. К вопросу об оценке эффективности работы системы физической защиты объекта // Информация и безопасность: Воронеж, Воронежский гос. техн. университет, 2011, т14, №2. - с. 279-282.

# Оглавление

Введение ..... 3
Базовые положения модельного подхода ..... 5
Построение траектории в частично известной обстановке ..... 10
Способы и примеры описания состояний ..... 12
Пример решения модельной задачи ..... 17
Адаптация правил поведения ..... 24
Заключение ..... 28
Библиографический список ..... 29