

Модели взаимодействующих автономных агентов

В.Г. Редько

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия, vgreko@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследованы модели взаимодействующих автономных агентов. В основном изучаются биологически инспирированные модели, характеризующие взаимодействие, в результате которого агенты обеспечивают охрану собственной территории. В частности, в компьютерной модели было показано, что два агента, помещённые в клеточный мир, способны разделить этот мир на два примерно равных участка, каждый участок представляет собой «собственность» одного агента. Отдельный агент охраняет свой участок, угрожая другому агенту. Также проанализированы случаи коллективной защиты относительно слабыми агентами своей территории от хищников.

Ключевые слова: взаимодействующие автономные агенты, охрана своей территории, агрессивность, коллективное поведение

1. Введение

В настоящей работе изучаются модели взаимодействующих автономных агентов. Рассматриваются биологически инспирированные модели, характеризующие взаимодействие, в результате которого агенты обеспечивают охрану собственной территории. При исследовании моделей будем отталкиваться от работ одного из основателей этологии (науки о поведении животных) Конрада Лоренца, который детально характеризует взаимодействие животных при охране своей территории [1, 2]. При охране своей территории агенты часто проявляют определённую агрессивность.

2. Биологически инспирированные модели охраны собственной территории

2.1. Биологические примеры охраны животными своей территории, примеры агрессии

Приведём характерные примеры охраны животными своей территории, примеры агрессивности, представленные в [1, 2].

Большие стаи скворцов коллективно нападают в воздухе на ястреба-перепелятника, отбивая у него возможность нападать на них. Отметим, что примерно такое поведение (нападение большого коллектива слабых агентов на агентов-«ястребов») возникало при компьютерном моделировании эволюции агентов, имеющих признаки близких по виду агентов [3-5].

Аналогично гуси могут сомкнутыми рядами атаковать лису, которая медленно отступает от трубящей стаи гусей.

Ещё один яркий пример. Лоренц описывает,

как он плавал с маской, дыхательной трубкой и лапами в море в окрестностях Флориды [1, 2]. Он наблюдал, что в поле его зрения было только по одному экземпляру некоторых ярко окрашенных рыб. А когда одна из таких рыб стала медленно приближаться к наблюдательному пункту Лоренца (по-видимому, в поисках пищи), то местная рыба того же вида с беспримечной яростью бросилась на чужака и прогнала его со «своей территории». Причём рыб другого вида «хозяин» участка не трогал. Лоренц интерпретировал это как борьбу «хозяина» за «свой» участок добычи пищи.

Примерно такое же поведение наблюдалось в большом аквариуме для двух рыб (цихлид). Сначала более сильная рыба постаралась захватить весь аквариум (как свою собственную территорию), а вторую загнала в маленький уголок. Но потом вторая рыба постепенно расширяла свой участок и в результате две рыбы смогли поделить аквариум на два примерно равных участка, после чего два угрожающие друг другу противника непрерывно патрулировали вдоль границы между этими участками. Отметим, что здесь мы немного упрощённо (но достаточно для построения модели) характеризуем основные черты эксперимента с рыбами в большом аквариуме, подробнее см. [1, 2].

Если аквариум не очень просторный, то происходит агрессивное нападение рыб друг на друга. При этом самцы более агрессивные, чем самки. И даже если в аквариуме остаётся одна пара рыб (самец и самка), то самец может растерзать самку.

Интересный эксперимент проделали с двумя парами рыб, разделив один достаточно большой аквариум пополам прозрачным стеклом и поместив каждую пару в свою половину аквариума. Тогда каждая рыба направляла свою здоровую

злость на соседа своего пола: самка нападала на самку, а самец – на самца. Но иногда в таком эксперименте пограничное стекло зарастало водорослями, и тогда в каждой половине аквариума самец начинал грубо обращаться со своей самкой. Стоило как следует протереть разделительное стекло между «квартирами», как восстанавливалась яростная, но безвредная ссора между соседями через прозрачное стекло.

Подробнее о таких примерах агрессивности см. [1, 2].

2.2. Описание модели разделения территории

Отталкиваясь от примера разделения аквариума двумя рыбами, построим модель двух автономных агентов, разделяющих общую территорию. Причём будем рассматривать: а) случай большой территории, на которой, в конце концов, могут разместиться два агента, б) случай относительно малой территории, которой недостаточно для размещения двух агентов.

Свойства территории и агентов. Будем считать, что территория и агенты обладают следующими свойствами. Территория (мир агентов) ограничена, считаем, мир агентов – полоска местности определённой длины, состоящая из отдельных клеток. То есть мир агентов – это цепочка клеток. На этой территории имеется пища агентов, порции пищи случайно распределены по клеткам территории. В одной клетке может быть только одна порция пищи. Число клеток в мире агентов равно N . Число порций пищи равно M ($M < N$). Агенты могут съедать эти порции пищи. Когда агент съедает порцию пищи в определённой клетке, то новая порция пищи появляется в другой случайной клетке, в которой ещё нет порции пищи. То есть количество порций пищи в мире постоянно.

Оба агента имеют определённый ресурс R_1 и R_2 . Кроме того, у каждого агента имеется «свой» участок, аналог собственного дома. При качественном рассмотрении поведения агентов можно считать, что сначала первый агент имеет больший ресурс: $R_1 > R_2$. При компьютерных расчетах обычно считалось, что начальные ресурсы агентов одинаковы. Ресурсы агентов меняются со временем. Считаем, что время дискретно, $t = 1, 2, \dots$. В начальный момент времени первый агент считает своим участком весь мир, кроме самой крайней правой клетки, на которую с помощью угроз он вытесняет второго агента (это аналогично изложенному выше эксперименту с двумя рыбами в большом аквариуме).

Опишем подробнее *действия агентов*. Каждый такт времени каждый агент может выполнить следующие действия:

- 1) Угрожать другому агенту.
- 2) Нанести удар другому агенту, это можно

сделать, когда этот другой агент находится в соседней клетке.

- 3) Съесть порцию пищи, если в той клетке, в которой находится агент, имеется порция пищи.
- 4) Уйти от угрожающего агента в противоположную от него сторону.
- 5) Переместиться на одну свободную клетку случайно вправо или влево, если текущая клетка агента не находится на краю мира, а если текущая клетка находится на краю мира, то переместиться на одну клетку в сторону от края мира.
- 6) Находиться в состоянии покоя, не перемещаться.

Считаем, что *качественно поведение агентов в большом мире* можно представить следующим образом.

После того как первый агент, угрожая второму, вытеснил второго агента на крайнюю правую клетку, первый агент начинает ходить по своему участку и питается, находя порции пищи. Второй агент делает попытки выйти из своей правой клетки, но видя такие попытки, первый агент угрожает второму. После такой угрозы второй агент отступает на свою правую клетку. Тем не менее, спустя некоторое время второй агент снова повторяет попытки пройти левее. Постепенно второй агент отвоевывает у первого сначала одну клетку, а затем после повторных попыток может постепенно отвоевывать и другие клетки. Считаем, что клетка становится принадлежащей к участку второго агента после того, как второй агент побывал на этой клетке не менее K раз. При этом первый агент после каждой попытки второго агента выйти из своего участка в левую сторону угрожает второму агенту. Когда второй агент вносит определённую клетку в свой участок, то участок первого агента уменьшается на эту клетку. Такой итеративный процесс перенесения пограничных клеток из участка первого агента в участок второго агента продолжается до тех пор, пока размеры участков агентов не станут приближённо равны друг другу. Когда какой-либо агент приближается к участку другого агента, то этот другой агент угрожает тому, который приближается.

Для количественной характеристики участков в итеративном процессе можно ввести границу участка второго агента, т.е. крайнюю левую клетку участка второго агента. Обозначим номер этой клетки S_B .

При съедании агентом порции пищи, его ресурс увеличивается на величину D_p . При выполнении любого из других действий ресурс агента уменьшается на величину D_{M1} , D_{M2} , D_{M4} , D_{M5} , D_{M6} , соответственно. При получении удара ре-

курс ударяемого агента уменьшается на величину D_L . Считаем, что потеря ресурса при получении удара значительно больше, что при остальных действиях.

Если ресурс агента стал меньше нуля, то такой агент погибает.

Выбор действия осуществляется следующим образом. Перечисляем действия в порядке их приоритетов.

А. Если к рассматриваемому агенту приблизился другой агент на расстояние, меньшее, чем $Dist$, то рассматриваемый агент угрожает другому. Это действие можно обозначить «угрожать другому агенту». Если агент выполнил действие «угрожать», то он уже не выполняет других действий.

Б. Если агент видит другого угрожающего агента, то агент либо перемещается на одну клетку в противоположную сторону от угрожающего агента, если имеется свободная соседняя клетка, расположенная в противоположную от угрожающего агента сторону, либо остаётся в состоянии покоя, если такой свободной клетки нет. Это действие можно обозначить «уйти от угрожающего агента».

В. Если агент не выбрал действия согласно пунктам А, Б, то он проверяет, имеется ли порция пищи в его клетке. Если в клетке имеется пища, то агент съедает всю порцию пищи из своей клетки. Это действие можно обозначить «питаться».

Г. Если агент не выбрал никакого действия согласно пунктам А-В, и нет другого агента в ближайших трёх клетках, то агент выбирает действие «случайно переместиться». При этом агент перемещается на одну свободную клетку случайно вправо или влево, если текущая клетка агента не находится на краю мира, а если текущая клетка находится на краю мира, то он перемещается на одну клетку в сторону, противоположную этому краю мира.

Д. Если агент не выбрал никакого действия согласно пунктам А-Г, то он выбирает действие «покой».

Каждый такт времени агент выполняет одно действие. В конце каждого такта проверяется, вышел ли второй агент из своего участка и, если он из участка вышел, то подсчитывается, сколько раз этот агент посетил эту новую для него клетку. Если число посещений этой клетки превысило определённый порог K , то второй агент присоединяет эту клетку к своему участку, а участок первого агента уменьшается на эту клетку, в результате граница между участками смещается влево, т.е. величина C_B уменьшается на 1.

Для случая большой территории не будем рассматривать удары между агентами. Удары будем рассматривать в случае малой территории.

В случае *малого мира* (содержащего, например, всего 4 клетки) первый агент быстро загоняет второго агента в правый край мира, после чего агенты начинают ударять друг друга и терять ресурс. Так как ресурс второго агента меньше, чем ресурс первого, то ресурс второго агента уменьшается до нуля, и второй агент погибает. Остается только первый агент. Так как такое поведение качественно понятно, то компьютерное моделирование для случая малого мира не проводилось.

Для детального анализа поведения агентов в случае большого мира было проведено компьютерное моделирование.

2.3. Результаты компьютерного моделирования. Случай большой территории

Приведём результаты компьютерного моделирования.

Расчёты проводились для следующих параметров.

Число клеток в мире агентов $N = 20$. Число порций пищи $M = 10$. Порог для присоединения клетки к участку второго агента $K = 2$. Минимальное расстояние между агентами, при котором агент решает угрожать другому агенту, равно $Dist = 5$. Прирост ресурса агента (R_1 или R_2) при съедании им порции пищи равен $D_P = 1$. Расход ресурса агента на действие «угрожать другому агенту» равен $D_{M1} = 0.02$, расход ресурса на действия «уйти от угрожающего агента» и «случайно переместиться» равен $D_{M4} = D_{M5} = 0.01$. На действие «покой» ресурс не расходовался. Начальный ресурс агентов был равен 10.

На рис. 1-3 показаны примеры динамики агентов для различных используемых датчиков случайных чисел.

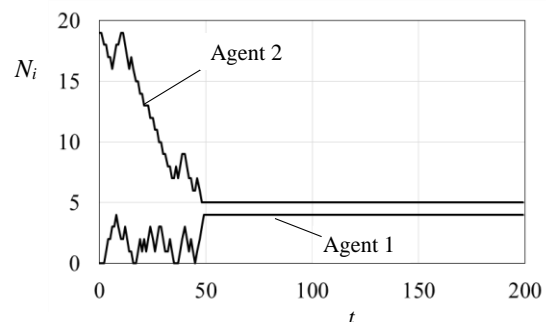


Рис. 1. Пример зависимости положения агентов (номеров клеток N_i) от времени t . Отдельный расчёт

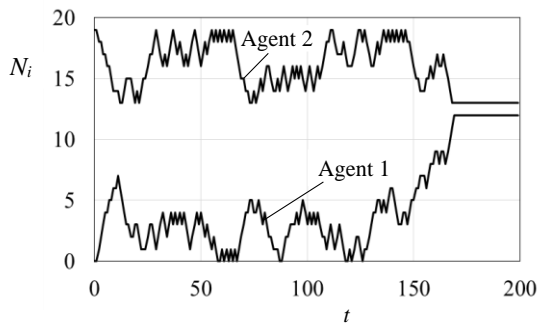


Рис. 2. Пример зависимости положения агентов (номеров клеток N_i) от времени t . Отдельный расчёт

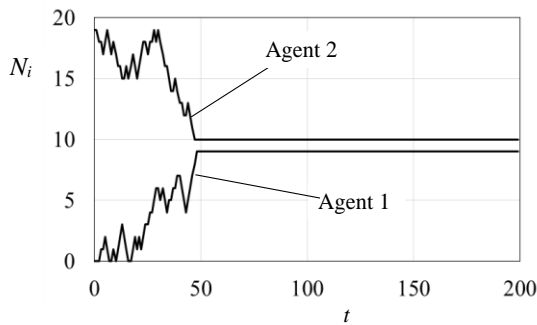


Рис. 3. Пример зависимости положения агентов (номеров клеток N_i) от времени t . Отдельный расчёт

Приведённые рисунки показывают, что, хотя конкретная динамика для этих случаев несколько различна, тем не менее, для всех случаев характерны следующие общие черты. Первый агент начинает двигаться из нулевой клетки, второй агент – из 19-й клетки; в конечном итоге, агенты останавливаются на удалении одной клетки друг от друга. Анализ действий агентов показывает, что в конечных положениях агенты только угрожают друг другу.

Для более чёткого анализа было проведено усреднение по 10000 различным вариантам датчиков случайных чисел. Усреднённые результаты представлены на рис. 4, 5.

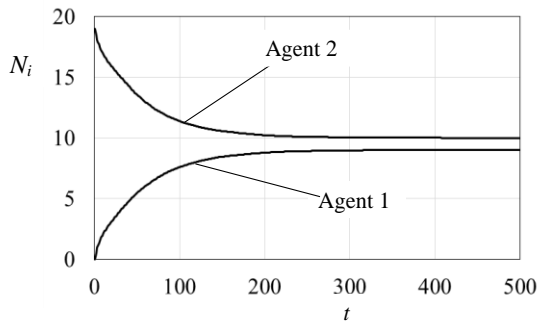


Рис. 4. Усреднённые зависимости положения агентов (номеров клеток N_i) от времени t

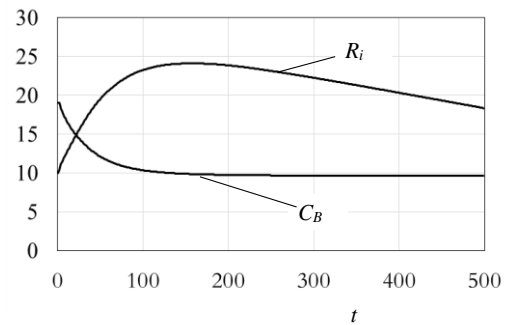


Рис. 5. Усреднённые зависимости ресурса агентов R_i и номера пограничной клетки между участками агентов C_B от времени t

Рис. 4 показывает, что агенты сначала движутся из крайних клеток мира навстречу друг другу. Наблюдение за действиями агентов показывает, что сначала они могут случайно перемещаться, питаться, угрожать друг другу и уходить от угрожающего агента (один от другого). А в конце концов, агенты останавливаются в среднем на расстоянии одной клетки друг от друга в середине мира, при этом они только угрожают друг другу и не совершают других действий.

Рис. 5 показывает, как меняются ресурсы агентов R_1 и R_2 (в среднем эти ресурсы для двух агентов приблизительно равны друг другу, поэтому зависимость ресурсов от времени показана одной кривой). Причём в начале процессов агенты эпизодически питаются и их ресурсы за счёт этого растут. Но в дальнейшем агенты только угрожают друг другу, а это действие приводит к расходу ресурсов и ресурсы агентов постепенно уменьшаются.

Отметим, что однозначный выбор действия «угрожать» в конце процессов обусловлен схемой строгих приоритетов действий (см. пункты А-Д предыдущего раздела). Такую приоритетность можно немного ослабить, если модифицировать схему выбора действия агентом следующим образом. Считаем, что агент совершает определённое действие не каждый раз, когда выполняются перечисленные в пунктах А-Д условия, а с определённой вероятностью при выполнении условий этой схемы. Тогда в конце рассматриваемых процессов агенты будут выполнять не только действие «угрожать», а иногда и другие действия, в частности, эпизодически они будут питаться. Такое поведение агентов при ослаблении приоритетности было подтверждено компьютерными расчётами. Причём расчёты показали, что при достаточном ослаблении приоритетности ресурсы агентов в конце процессов не уменьшаются.

На рис. 5 приведена также усреднённая зависимость от времени номера пограничной клетки между участками агентов C_B . Видно, что в конце

процессов граница между участками приближается к середине мира.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования (рис. 4, 5) показывают, что агенты делят клеточный мир на два примерно равных участка, и в конце концов, останавливаются на границах участков и угрожают друг другу. Такое поведение согласуется с результатом биологического эксперимента с двумя рыбами в большом аквариуме [1, 2].

2.4. Коллективная защита своей территории

Перейдём к рассмотрению свойств коллективной защиты своей территории от хищников. Биологические примеры такого поведения (защита большой стаи скворцов от ястреба-перепелятника и защита стаи гусей от лисы [1, 2]) были представлены выше в разделе 2.1.

Такое поведение целого коллектива достаточно понятно. Тем не менее, возникает важный вопрос: как может зародиться такое поведение? Определённый ответ на этот вопрос дают работы [3-5], в которых рассматривалась эволюция популяции агентов в двумерной клеточной среде и эволюционно возникала коллективная защита агентов от хищников.

Кратко рассмотрим модель работ [3-5]. Агенты эволюционирующей популяции могли выполнять следующие действия: отдыхать, питаться, рожать потомка, переместиться на одну из соседних клеток, атаковать другого агента в своей клетке. Сенсоры агента воспринимали уровень собственной внутренней энергии, наличие ресурса и число агентов в ближайших клетках. Кроме того, каждый агент имел маркер, кодируемый вектором достаточно большой размерности. Маркеры служили индикаторами схожести агентов. Поведение агентов управлялось однослойной нейронной сетью. Веса синапсов нейронной сети и вектор-маркер составляли генотип агента. В процессе эволюции генотип передавался от родителей к потомкам с малыми мутациями. Агенты с близкими маркерами представляли собой группы «своих» агентов, т.е. своего рода «родственников». В частности, агент-потомок имел маркер, близкий к маркеру агента-родителя. Расстояние между собственным маркером агента и маркером другого агента в клетке служило отдельным входом нейронной сети агента. То есть, благодаря маркерам, агенты могли отличать агентов своей группы от агентов чужой группы (родственников от не-родственников).

Результаты компьютерного моделирования работ [3-5] показали, что в процессе проанализированной эволюции происходит формирова-

ние ряда стратегий поведения агентов. Было обнаружено эволюционное формирование известных стратегий поведения, аналогов голубей, ястребов и буржуа [6]. «Голуби» никогда не атакуют других агентов и пытаются уйти из-под атаки, а «ястребы» охотятся на других агентов. «Буржуа» находятся в одной и той же клетке и атакуют любого чужого агента, входящего в эту клетку.

Кроме того, формировались ещё две новые стратегии: «вороны» и «скворцы». Ворон покидал клетку с вместе членами своей группы (своими родственниками), но при обнаружении в клетке агента, не принадлежащего к своей группе, атаковал его. Скворцы оставались в клетке с членами своей группы и коллективно нападали на любого чужака, попадающего в клетку. Каждый скворец имел малый ресурс, однако коллективно скворцы могли уничтожить чужака, благодаря численному перевесу. Стратегия скворцов как раз подобна стайной защите от хищника, охарактеризованной в работах [1, 2]. Таким образом, в работах [3-5] в процессе эволюции агентов формировалась кооперативная защита своей территории агентами от «хищников». Важное свойство этих агентов – наличие маркеров, благодаря которым агенты могли отличать агентов своей группы от чужих агентов.

3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе изучены биологически инспирированные модели защиты своей территории автономными агентами. В частности, построена и исследована компьютерная модель двух автономных агентов, разделяющих общую территорию. Результаты компьютерного моделирования показывают, что эти агенты делят клеточный мир на два примерно равных участка, и в конце концов, останавливаются на границах своих участков и угрожают друг другу. Это прямо согласуется с результатами биологического эксперимента с двумя рыбами в большом аквариуме [1, 2].

Проанализированы процессы возникновения коллективной защиты относительно слабыми агентами своей территории от хищников.

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1). Автор благодарен Б.В. Крыжановскому за плодотворные дискуссии.

Models of Interacting Autonomous Agents

Vladimir G. Red'ko

Abstract. In this work, models of interacting autonomous agents are studied. Biologically inspired models are studied; agents ensure the protection of their own territory in these models. In particular, it is shown that two agents placed in a cellular world are capable to divide this world into two approximately equal sections, each section representing the “property” of one agent. Each agent protects its section, threatening the other agent. Cases of collective defense by relatively weak agents of their territory from predators are also analyzed.

Keywords: interacting autonomous agents, protection of a territory, aggressiveness, collective behavior

Литература

1. К. Лоренц. Агрессия, или Так называемое зло. М., АСТ, 2023.
2. К. Лоренц. Так называемое зло. М., Культурная революция, 2011.
3. M. Burtsev, P. Turchin. Evolution of cooperative strategies from first principles. “Nature” V. 440 (2006), № 7087, 1041–1044.
4. М.С. Бурцев, П.В. Турчин. Эволюция кооперативных стратегий из первых принципов. В книге П.В. Турчин. Историческая динамика. На пути к теоретической истории. М., Издательство ЛКИ, 2007. С. 317–328. См. также: [https://www.keldysh.ru/pages/mrbur-web/publ/burtsev.turchin.\(2007\).nat_rus.pdf](https://www.keldysh.ru/pages/mrbur-web/publ/burtsev.turchin.(2007).nat_rus.pdf) (дата обращения 12.03.2024).
5. М.С. Бурцев. Исследование новых типов самоорганизации и возникновения поведенческих стратегий. Кандидатская диссертация. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 2005, <https://www.keldysh.ru/pages/mrbur-web/diss/> (дата обращения 12.03.2024).
6. J. Maynard Smith. The theory of games and the evolution of animal conflicts. “Journal of Theoretical Biology” V. 47 (1974), 209–222.