

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ «НАВИГАЦИЯ»

А.Л. Яловец

Институт программных систем НАН Украины Украина,
03680, Киев, проспект Академика Глушкова, 40,
тел. (044) 526 15 38, E-mail: yal@isofts.kiev.ua

Исследуется проблема преследования на плоскости с точки зрения мультиагентного подхода. Выполняется постановка задачи преследования и излагаются методы моделирования поведения агентов, реализованные в мультиагентной системе «Навигация», предназначенной для моделирования процессов преследования на море кораблей-нарушителей кораблями береговой охраны.

The problem of pursuit on a plane from the point of view multi-agent approach is researched. Setting up of the task of pursuit is carried out and simulation methods of behaviour of the agents, realized in multi-agent system "Navigation" are stated, which intended for modelling of processes of pursuit on the sea of the ships-infringers by the ships of a coast guard.

Введение

Задача преследования на плоскости является известной и достаточно глубоко изученной (см., например, [1, 2]), причем в основном ее исследования выполняются в рамках теории дифференциальных игр [3, 4]. Вместе с тем, данная задача может успешно решаться и с помощью методов и моделей, разрабатываемых в рамках мультиагентного подхода. При этом, окружающая среда рассматривается как динамическая система, а убегающие и преследователи – как агенты, действующие в такой системе. Цель данной статьи – это постановка задачи преследования на плоскости с точки зрения мультиагентного подхода и изложение методов моделирования поведения агентов, реализованных в мультиагентной системе «Навигация», предназначенной для моделирования процессов преследования на море кораблей-нарушителей кораблями береговой охраны.

1. Постановка задачи преследования на плоскости с точки зрения мультиагентного подхода

Опираясь на традиционную постановку задачи преследования на плоскости, рассматриваемую в рамках теории дифференциальных игр и изложенную, например, в [2], приведем ее уточнения, позволяющие, с одной стороны, сформулировать ее в терминах мультиагентного подхода, с другой, – определить перечень математических методов, требующих разработки.

Пусть на плоскости задано выпуклое множество S , соответствующее динамической среде, в пределах которой действуют агенты. Содержательно множество S можно интерпретировать как морской участок, в пределах которого действуют корабли различного назначения (интерпретируемые как агенты).

В общем случае можно выделить три категории агентов:

1) агенты-убегающие, формирующие множество $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$;

2) агенты-преследователи, формирующие множество $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$;

3) прочие агенты, формирующие множество A , не являющиеся ни убегающими, ни преследователями, но также находящиеся в S .

Далее нас будут интересовать только агенты первых двух категорий, хотя в некоторых компонентах задачи преследования влияние агентов множества A будет учитываться (например, в задачах маневрирования). Подчеркнем, что влияние агентов множества A содержательно означает учет природы, геометрии и поведения объектов, которым такие агенты соответствуют. В частности, такие объекты могут быть как движущимися, так и неподвижными, как точечными (например, корабли), так и площадными (например, острова).

В отличие от традиционной постановки задачи [2], в нашем случае рассматривается не один, а множество убегающих E , где $\text{card}(E) \geq 1$. Это обуславливает необходимость рассмотрения разных групп Gr_k преследователей P_i (где $P_i \in P$, $\text{card}(P) \geq \text{card}(E)$), каждая из которых является прототипом наряда (из традиционной постановки) и преследует вполне определенного убегающего E_j ($E_j \in E$). Введем множество групп $Gr = \{Gr_1, Gr_2, \dots, Gr_n\}$, где каждая Gr_k содержит некоторое количество P_i ($P_i \in P$) и одного E_j ($E_j \in E$), т. е. для любой группы Gr_k выполняется условие, что $\text{card}(Gr_k) \geq 2$. Для любых двух групп справедливо, что $Gr_k \cap Gr_{k+1} = \{\emptyset\}$. Ясно, что $Gr_1 \cup Gr_2 \cup \dots \cup Gr_n = P \cup E$, где $n = \text{card}(Gr) = \text{card}(E)$.

Каждый агент P_i, E_j начинает движение в момент времени $t = 0$, имеет текущие координаты в ортогональной системе координат и перемещается в S , находясь в состоянии простого движения в любой момент времени $t > 0$, предшествующий его возможной остановке (вследствие захвата либо иных причин). Параметры,

© А.Л. Яловец, 2014

характеризующие состояние i -го агента множеств P, E в момент времени $t \geq 0$, однозначно описываются кортежем $\langle id_i, Gm_i, Cl_i, Bn_i, \{x_i, y_i\}, \{v_i, v_i^{\max}\}, \alpha_i \rangle$, где id_i – уникальный идентификатор i -го агента; Gm_i – размер объекта, соответствующего i -му агенту (домен допустимых значений: «большой», «средний», «малый»), Cl_i – класс объекта, соответствующего i -му агенту (домен допустимых значений: «военный», «гражданский»), Bn_i – принадлежность объекта, соответствующего i -тому агенту (домен допустимых значений: «свой», «чужой», «нераспознанный», «береговая охрана»), $\{x_i, y_i\}$ – текущие координаты i -го агента; $\{v_i, v_i^{\max}\}$ – текущая и максимально возможная скорость движения i -го агента; α_i – текущий угол движения i -го агента в ортогональной системе координат. Таким образом, в качестве параметров движения i -го агента рассматривается не линейная скорость, а скорость v_i и угол движения α_i , поскольку в произвольный момент времени $t > 0$ любая траектория движения может быть аппроксимирована ломаной с конечным числом вершин, где любой фрагмент этой ломаной, являющийся прямой, может быть однозначно описан с помощью именно этих двух параметров, значения которых в данный момент времени являются постоянными.

Будем говорить, что преследователи, принадлежащие отдельной группе Gr_k , догнали убегающего E_j ($E_j \in Gr_k$), если хотя бы один из преследователей $P_i \in Gr_k$ оказался в зоне захвата убегающего E_j , а сам E_j при этом считается захваченным. Отметим, что мы не используем словосочетания «осуществил встречу», применяемого в традиционной постановке [2], поскольку под ним понимается совпадение положений P_i и E_j , а используем понятие «догнал». Мы, рассматривая агентов P_i и E_j , учитываем физические свойства объектов, соответствующих таким агентам. Очевидно, что ситуация совпадения положений фактически соответствует столкновению объектов, в качестве которых выступают агенты. Как следствие, мы рассматриваем зону захвата, под которой понимается квадрат, сторона которого зависит от геометрических размеров (задаваемых параметром Gm_j) объекта, соответствующего E_j , а центр квадрата задается текущими координатами $\{x_j, y_j\}$ агента E_j , что в целом обеспечивает предотвращение столкновению объектов, соответствующих агентам P_i и E_j .

Будем говорить, что в каждый момент времени $t \geq 0$ убегающему $E_j \in Gr_k$ известно свое положение, но он знает положение только тех преследователей $P_i \in P$ и других убегающих, принадлежащих множеству E , которые находятся в его зоне наблюдения. Под зоной наблюдения убегающего E_j понимается квадрат, сторона которого равняется некоторому положительному числу и содержательно интерпретируется как удвоенное значение пространства видимости в одну сторону, а центр квадрата задается текущими координатами $\{x_j, y_j\}$ убегающего E_j . Посредством зоны наблюдения моделируется общая видимость вследствие влияния погодных условий, времени суток и т. п.

В отличие от традиционной постановки [2], в нашем случае убегающий $E_j \in Gr_k$ не знает своих преследователей. Как следствие, убегающий $E_j \in Gr_k$ анализирует всех возможных преследователей $P_i \in P$, находящихся в его зоне наблюдения, но реагирует только на тех из них, кто гипотетически может выступать в качестве его преследователей, т. е. может входить в состав группы Gr_k , а с прочими агентами только избегает столкновения. Для выявления, кто именно является его преследователями, агент-убегающий динамически формирует предположения, которые в каждый момент времени $t > 0$ уточняются в зависимости от поведения его возможных преследователей.

Каждый агент $P_i \in P$ и $E_j \in E$ избегает столкновения с прочими агентами, попавшими в его зону столкновения, за исключением ситуации, когда P_i и E_j принадлежат одной и той же группе Gr_k . Зона столкновения геометрически совпадает с зоной захвата (см. выше). Для избегания столкновений агенты используют специальные методы маневрирования. В случае, если P_i и E_j принадлежат одной и той же группе Gr_k , зона столкновения рассматривается как зона захвата, что соответствует ситуации, когда P_i догнал E_j .

Так же, как и в традиционной постановке [2], каждый агент-преследователь $P_i \in Gr_k$ в момент времени $t \geq 0$ знает положение всех преследователей, принадлежащих множеству P , включая себя, положение $E_j \in Gr_k$, скорость и направление его движения, а также положение, скорость и направление движения прочих убегающих, принадлежащих множеству E , в тот же момент времени t , но ему неизвестны будущие маневры таких агентов-убегающих.

Каждый агент-преследователь $P_i \in Gr_k$ в момент времени $t \geq 0$ также анализирует состояние убегающих $E_n \in (GR \setminus \{Gr_k\})$. Обозначим расчетное время захвата преследователем P_i убегающего $E_j \in Gr_k$ как $t_{P_i}^{E_j}$. Тогда будем говорить, что состоялся взаимный переход агентов-преследователей в другие группы, если для двух

агентов $P_i \in Gr_k$ и $P_m \in Gr_s$, которые соответственно преследуют агентов-убегающих $E_j \in Gr_k$ и $E_r \in Gr_s$, одновременно выполняются соотношения $t_{P_i}^{E_j} > t_{P_i}^{E_r}$ и $t_{P_m}^{E_r} > t_{P_m}^{E_j}$. При этом агент P_i переходит из группы Gr_k в группу Gr_s , а агент P_m – из группы Gr_s в группу Gr_k . Ограничением возможных переходов является условие, что $card(Gr_k) = const$ и $card(Gr_s) = const$. Для выполнения таких взаимных переходов агенты-преследователи вступают в *переговоры*.

По аналогии с традиционной постановкой [2], преследователи $P_i \in Gr_k$ нацелены догнать убегающего $E_j \in Gr_k$ за минимальное время, а убегающий E_j – отсрочить момент захвата либо избежать его, если возможно.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать несколько выводов.

Во-первых, можно утверждать, что в предлагаемой постановке знать закон движения произвольного агента $E_j \in E$ (и, как следствие, агентов $P_i \in P$) практически невозможно, поскольку на изменение характера их движения влияет достаточно много факторов. В частности, на характер движения агента-убегающего влияют:

- подвижные и неподвижные агенты, принадлежащие множествам P , E , A и находящиеся в границах множества S , для избегания столкновений с которыми агенту-убегающему необходимо маневрировать;
- ограничения на действия агента-убегающего, накладываемые зоной наблюдения;
- неопределенность состава его агентов-преследователей;
- возможность динамического изменения состава его агентов-преследователей.

Во-вторых, можно назвать основные различия между предложенной постановкой задачи преследования на плоскости и традиционной постановкой [2] (см. таблицу).

Таблица. Основные различия между постановками задачи преследования на плоскости с точки зрения мультиагентного подхода и теории дифференциальных игр

Мультиагентный подход	Теория дифференциальных игр
Закон движения агента неизвестен	Закон движения точки известен
Рассматривается n ($n \geq 1$) убегающих и m ($m \geq 1$) преследователей, где $m \geq n$	Рассматривается один убегающий и несколько преследователей
Существует задача оптимального формирования коалиций (групп)	Задача оптимального формирования нарядов (групп) не формулируется
В каждый момент времени убегающему известно свое положение, но он знает положение только тех преследователей и прочих убегающих, которые находятся в его зоне наблюдения	В каждый момент времени убегающему известно как свое положение, так и положение всех его преследователей
Убегающий не знает своих преследователей	Убегающий знает своих преследователей

В-третьих, можно определить перечень требуемых методов, на основе которых агенты могли бы принимать решения в динамической среде. К таким методам принадлежат:

- методы формирования стратегий поведения агентов;
- метод распознавания совокупности агентов, преследующих агента-убегающего;
- метод перегруппировки агентов-преследователей;
- метод генерации оптимальных групп агентов-преследователей;
- методы маневрирования агентов для избегания столкновений с прочими агентами.

В данной статье мы будем рассматривать три первых группы методов.

2. Методы моделирования поведения агентов

2.1. Метод преследования на плоскости. Известные методы преследования в основном разрабатывались для военного назначения (в рамках исследований по наведению ракет на движущуюся цель [5–7]). К таким методам относятся: метод погони, метод постоянного упреждения, метод пропорционального сближения и метод параллельного сближения. Из названных методов только метод параллельного сближения позволяет получить прямолинейную (а не криволинейную) траекторию полета ракеты до встречи с целью. Кроме того, как показано в [2], по своим свойствам данный метод соответствует методу окружности Аполлония.

Вместе с тем, у метода параллельного сближения (как и у метода окружности Аполлония) есть определенный недостаток, не позволяющий нам применить именно эти методы в качестве стратегии преследования: данные методы явно не используют ортогональной системы координат, использование которой, как мы показали выше, необходимо исходя из предложенной постановки задачи преследования на плоскости.

Предлагаемый метод преследования основывается на следующей постановке: два объекта (убегающий и преследователь) находятся в состоянии простого движения, при этом задано (см. рис. 1): текущие координаты убегающего (точка E), текущие координаты преследователя (точка P), направление движения убегающего (угол α_E), скорость движения убегающего (v_E) и скорость движения преследователя (v_P).

При этом интуитивно понятно, что убегающий и преследователь встретятся в некоторой точке C (при условии, что $v_P > v_E$) через некоторое время $t = const$.

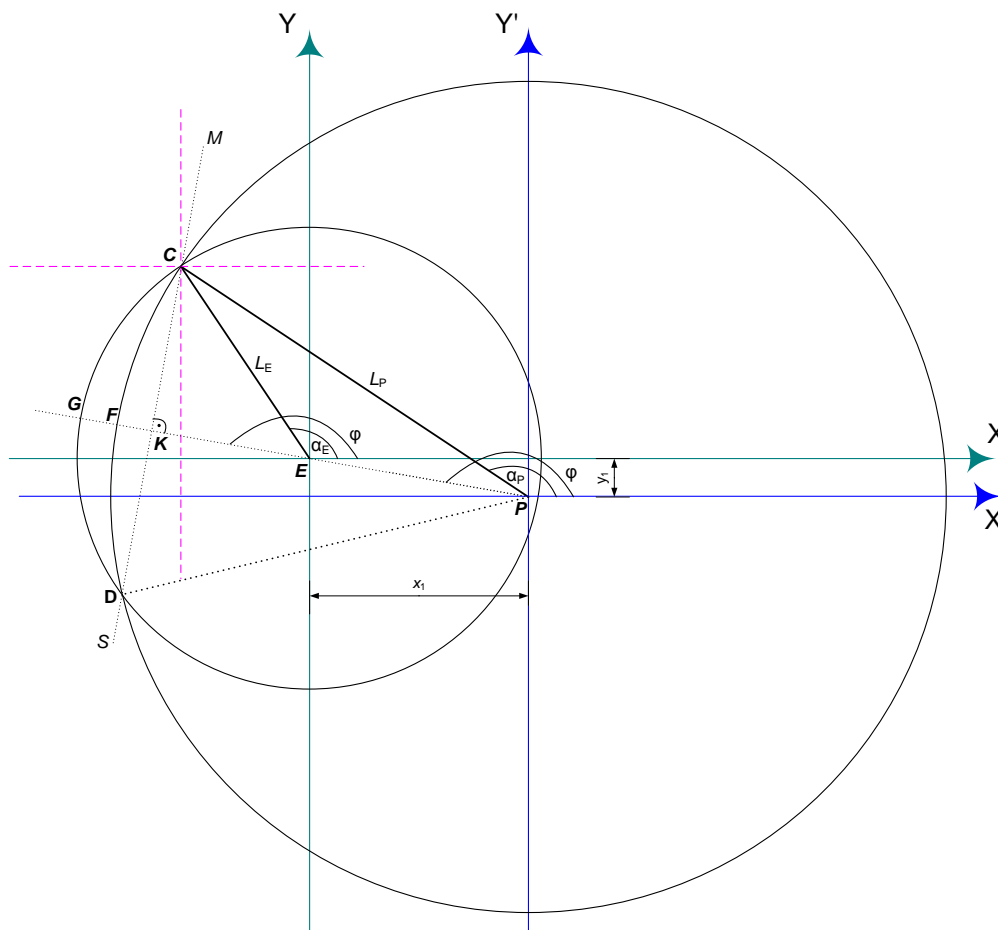


Рис. 1. Сущность предлагаемого метода преследования на плоскости

В качестве неизвестных параметров выступают: искомое направление движения преследователя (угол α_P); длина пути убегающего (L_E); длина пути преследователя (L_P); время t , необходимое для достижения объектами точки C ; координаты точки C .

Для решения задачи преследования на плоскости важно вычислить угол α_P , задающий направление движения преследователя. Зная этот угол, несложно вычислить все прочие неизвестные параметры задачи.

Выполним дополнительные геометрические построения (см. рис. 1). Очевидно, что прямые EC и PC можно рассматривать как радиусы двух окружностей, пересекающихся в точках C и D . Построим эти окружности и проложим для них оси координат $X'EY$ и $X'PY'$. Проведем секущую SM через точки C и D . Соединим точки P и D прямой. Очевидно, что полученный в результате треугольник PDC является равнобедренным. Ясно, что высота треугольника PK пройдет также и через точку E . При этом высота PK пересечет оси абсцисс X и X'

под одним и тем же углом φ . Очевидно, что $\text{tg}(180^\circ - \varphi) = \frac{y_1}{x_1}$ и отсюда мы можем вычислить угол φ (расстоя-

ния x_1 и y_1 легко вычислить через координаты точек E и P). В свою очередь, $\sin(\varphi - \alpha_P) \cdot L_P = \sin(\varphi - \alpha_E) \cdot L_E = z$, где z – отрезок KC . Преобразовывая это уравнение и, учитывая, что

$L_E = v_E \cdot t$ и $L_P = v_P \cdot t$, получаем: $\sin(\varphi - \alpha_P) = \frac{v_E}{v_P} \cdot \sin(\varphi - \alpha_E)$. Отсюда можем вычислить требуемый угол

$$\alpha_P: \alpha_P = \varphi - \arcsin\left(\frac{v_E}{v_P} \cdot \sin(\varphi - \alpha_E)\right).$$

В работе [8] мы показали, что предложенный метод преследования сводится как к методу параллельного

сближения, так и к методу окружности Аполлония.

На основе предложенного метода преследования на плоскости можно сформировать *целесообразную стратегию поведения преследователя*. Как показано в [8], определение целесообразного направления движения преследователя по предложенному методу в точности совпадает с решением, получаемым по методу параллельного сближения. Как следствие, стратегия поведения преследователя должна быть ориентирована на постоянный анализ поведения убегающего, определение целесообразного угла направления своего движения в момент изменения поведения убегающего и, вследствие этого, динамическую корректировку своего поведения.

Полученные результаты позволяют сделать выводы и о *целесообразной стратегии поведения убегающего*. Очевидно (см. рис. 1), что самый долгий путь преследователь пройдет, если убегающий будет двигаться по лучу *EG*. Так, если сравнить расстояния *PC* и *PG*, то легко заметить, что *PG* больше *PC* на отрезок *FG*. Отсюда вытекает целесообразная стратегия поведения убегающего для данного случая: он должен корректировать направление своего движения таким образом, чтобы оно максимально приближалось к направлению, задаваемому лучом, идущим от преследователя к убегающему.

Обобщая, отметим, что существенным преимуществом предложенного метода преследования на плоскости над методами-аналогами является то, что он основывается на использовании ортогональной системы координат, что является крайне важным для моделирования процессов преследования/убегания агентов в мультиагентной системе.

2.2. Метод управления стратегиями поведения агентов. В п. 2.1 статьи мы обосновали целесообразные стратегии поведения агента-убегающего и его агентов-преследователей, основанные на разработанном нами методе преследования. Но при этом остался неформализованным процесс управления использованием этих стратегий в рамках решения общей задачи преследования/убегания. Цель данного подраздела статьи – изложение *метода ближайшей точки*, обобщающего процессы использования стратегий поведения агентов для общего случая (*m* преследователей и *n* убегающих, где $m \geq n$).

2.2.1. Исследование стратегии преследования/убегания для случая «один убегающий – два преследователя». Данная стратегия преследования/убегания для случая «один убегающий – два преследователя», изложенная Р. Айзексом в [3, с.189] (для удобства изложения далее эту стратегию будем называть *стратегией Р. Айзекса*). Как будет показано далее, анализ данной стратегии важен потому, что в общем случае максимум два преследователя (из произвольного их количества) влияют на характер поведения исследуемого убегающего. Цель исследования – оценка целесообразности применения стратегии Р. Айзекса для управления стратегиями поведения агентов.

Сущность стратегии Р. Айзекса заключается в нахождении наиболее удаленной точки от убегающего в области, образованной в результате пересечения двух окружностей Аполлония, построенных для каждой из пар убегающий – преследователь, и выполнении простого движения (при условии, что скорости преследователей больше скорости убегающего) к этой точке как убегающим, так и его преследователями. При этом стратегии поведения убегающего и его преследователей будут оптимальными.

Для анализа стратегии Р. Айзекса нами разработан специализированный прототип системы, в котором реализована исследуемая стратегия. В ходе исследований установлено, что могут возникать 3 разных случая:

1) когда две окружности Аполлония пересекаются и преследователи расположены по разные стороны относительно линии, проходящей через точку дислокации убегающего и наиболее удаленную точку пересечения окружностей Аполлония (см. рис. 2, а).

2) когда две окружности Аполлония пересекаются и преследователи расположены по одну сторону относительно линии *MN*, проходящей через точку дислокации убегающего и наиболее удаленную точку пересечения окружностей Аполлония (см. рис. 2, б).

3) когда две окружности Аполлония не пересекаются (одна окружность находится внутри другой – см. рис. 2, в).

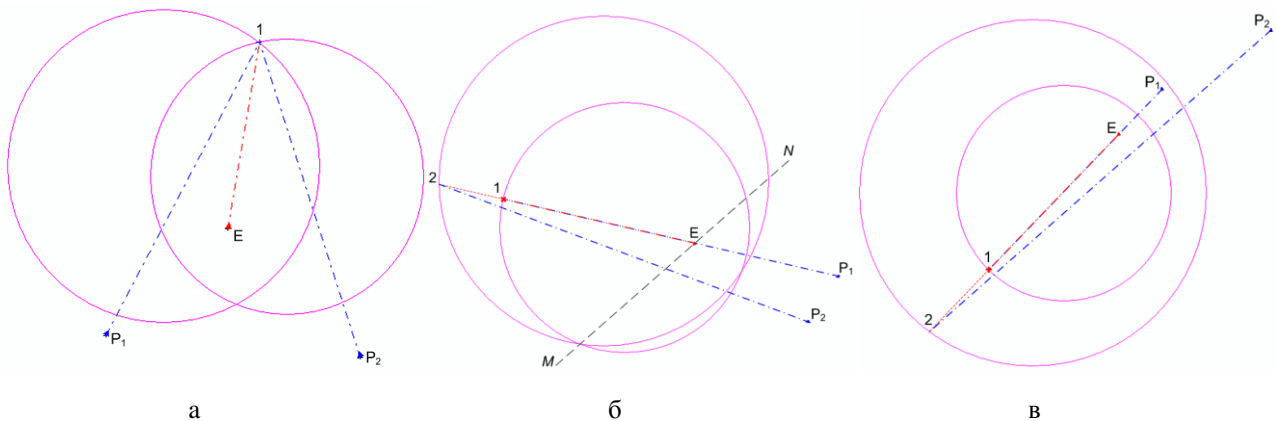


Рис. 2. Возможные варианты стратегий преследования/убегания агентов

Первый случай соответствует ситуации, рассмотренной Р. Айзексом в [3]. В этом случае убегающий E и преследователи P_1 и P_2 , в соответствии со стратегией Р. Айзекса, должны двигаться к точке 1 (как наиболее удаленной точке области пересечения окружностей Аполлония). При условии, что E , P_1 и P_2 будут находиться при этом в состоянии простого движения, они одновременно достигнут точки 1.

Второй и третий случаи соответствуют ситуации, когда убегающий E будет захвачен только одним преследователем (P_1) в точке 1, а другой преследователь (P_2) будет двигаться в направлении точки 2. Отметим, что во втором и третьем случаях точка 1 соответствует наиболее удаленной от убегающего E точке на окружности Аполлония, построенной от ближайшего преследователя (см. далее). Исходя из этого, в данных случаях оптимальная стратегия убегающего E заключается в том, что он должен двигаться в направлении, задаваемом лучом, направленным от преследователя P_1 к убегающему E , что полностью совпадает с нашими выводами (см. п. 2.1) о целесообразной стратегии поведения агента-убегающего. В свою очередь, преследователи P_1 и P_2 во всех случаях движутся в соответствии со стратегией параллельного сближения (или стратегии, соответствующей методу преследования, изложенному в п. 2.1).

Основным недостатком стратегии Р. Айзекса является то, что направление движения убегающего *вычисляется* в результате выполнения соответствующих расчетов, и не изменяется в процессе преследования. В действительности же направление движения убегающего *задается явно* в начале процесса преследования, как исходный параметр задачи преследования, и в любой последующий момент времени формируется ситуационно в зависимости от действий его преследователей (ясно, что при этом убегающий должен стремиться сформировать оптимальную стратегию убегания).

Очевидно, что метод, на основе которого будет осуществляться управление стратегиями поведения агентов, не должен иметь такого недостатка.

2.2.2. Метод ближайшей точки. Данный метод предназначен для формирования оптимального направления движения в зависимости от текущих направлений движения его преследователей. Как мы показали в п. 2.2.1, возможны два состояния (которые мы будем называть *равновесными состояниями*) по формированию оптимального направления движения убегающего:

Состояние 1. Когда убегающий и два его ближайших преследователя движутся к точке пересечения двух окружностей Аполлония как наиболее удаленной точке области пересечения этих окружностей (см. случай 1 в п. 2.2.1).

Состояние 2. Когда убегающий движется в направлении, задаваемом лучом, направленным от ближайшего преследователя к этому убегающему (см. случаи 2, 3 в п. 2.2.1).

Здесь под *ближайшим преследователем* понимается преследователь, который на данный момент времени может скорее всех прочих преследователей догнать убегающего (то есть точка Аполлония, построенная от этого преследователя, будет *ближайшей* к убегающему). Далее мы будем ссылаться на названные состояния.

Сущность *метода ближайшей точки* заключается в том, что убегающий в процессе преследования в каждый момент времени определяет ближайшую к нему точку Аполлония (из точек, построенных от преследователей, попавших в его зону наблюдения) и, если он не находится в равновесном состоянии, то постепенно изменяет угол своего движения для достижения равновесного состояния, либо, если он находится в равновесном состоянии, а положение этой точки Аполлония выводит его из этого состояния, то постепенно изменяет угол своего движения для достижения нового равновесного состояния. Отметим, что точка Аполлония и целесообразное направление движения преследователей, используемые в методе ближайшей точки, определяются с помощью метода преследования, изложенного в п. 2.1. Отличительной особенностью предложенного метода ближайшей точки является то, что он, в отличие от стратегии Р. Айзекса, вообще не требует построения окружностей Аполлония.

Детальное рассмотрение метода ближайшей точки приведено в [9].

Отметим, что данный метод справедлив для произвольного количества преследователей. Действительно, в любой момент времени преследования каждый агент-убегающий может оказаться в одном из двух состояний (либо в равновесном, либо в неравновесном). Если убегающий находится в неравновесном состоянии, то на его поведение в каждый момент времени влияет один и только один ближайший агент-преследователь, находящийся в зоне наблюдения убегающего. Если же агент-убегающий находится в равновесном состоянии, то в каждый момент времени на его поведение могут влиять максимум два агента-преследователя, относительно которых сформировано равновесное состояние. Так, как мы показали выше, существует два вида равновесных состояний. При этом в состоянии 2, независимо от общего количества преследователей, на поведение агента-убегающего влияет один и только один ближайший преследователь, находящийся в его зоне наблюдения. В состоянии 1 в общем случае на поведение убегающего могут влиять столько агентов-преследователей, сколько из них сформировали ту же самую общую точку Аполлония, сформированную двумя его ближайшими агентами-преследователями в соответствии с условиями возникновения состояния 1. То есть агент-убегающий, формируя оптимальную стратегию убегания, обязательно будет двигаться в направлении этой точки Аполлония, что соответствует сущности состояния 1, независимо от того, сколько агентов-преследователей сформировали такую точку. Иначе говоря, случай, когда произвольное количество агентов-преследователей формируют общую точку Аполлония, сводится к случаю, соответствующему состоянию 1.

Таким образом, метод ближайшей точки позволяет:

- адаптивно текущим изменениям формировать оптимальную стратегию поведения агента-убегающего;
- адаптивно текущим изменениям поддерживать оптимальные стратегии поведения агентов-преследователей;
- моделировать процессы преследования/убегания в реальном масштабе времени, учитывая при этом особенности поведения разных по свойствам агентов.

В целом можно утверждать, что метод ближайшей точки позволяет моделировать поведение агентов в мультиагентном стиле и является эффективным методом управления стратегиями преследования/убегания для произвольного количества агентов.

2.3. Метод распознавания агентов, преследующих убегающего. В каждый момент времени $t \geq 0$, предшествующий моменту его захвата, каждый агент-убегающий решает задачу распознавания множества агентов, гипотетически могущих выступать в качестве его преследователей. При этом каждый убегающий $E_j \in E$ рассматривает множество $M_1^j \subseteq P$ подвижных агентов $P_i \in P$, находящихся в его зоне наблюдения, и выполняет анализ текущих состояний агентов $P_i \in M_1^j$ для формирования предположений для определения своего целесообразного состояния (направления движения и скорости) в следующий момент времени.

Данная задача анализа включает в свой состав две подзадачи:

1) формирования подмножества M_2^j ($M_2^j \subseteq M_1^j$) агентов, которые потенциально могут выступать в качестве преследователей агента-убегающего $E_j \in E$;

2) выявление одного преследователя $P_k \in M_2^j$ (см. также замечание в п. 2.3.2), угроза наискорейшего захвата убегающего $E_j \in E$ которым является наиболее возможной.

Очевидно, что решение второй подзадачи (с учетом того, что управление стратегиями преследования/убегания агентов основывается на методе ближайшей точки) позволит агенту-убегающему точно определить свое целесообразное состояние, в которое он должен перейти в следующий момент времени.

2.3.1. Метод формирования множества M_2^j агентов, которые потенциально могут выступать в качестве преследователей агента-убегающего $E_j \in E$, основывается на последовательном попарном анализе текущих состояний подвижного агента E_j и агентов $P_i \in M_1^j$. При этом анализируются углы направления движения агентов E_j и P_i относительно линии, проведенной через точки их текущей дислокации (*линии дислокации*), и определяется признак, по какую сторону относительно линии дислокации агенты будут расположены в следующий момент времени (правее либо левее). Если значения признаков для агентов E_j и P_i совпадают и сумма углов направлений движений этих агентов, вычисленных относительно линии дислокации, составляет меньше 180° , то агент P_i добавляется в состав множества M_2^j . В результате завершения анализа формируется множество M_2^j , включающее всех агентов, которые гипотетически в данный момент времени могут рассматриваться в качестве преследователей агента E_j .

2.3.2. Метод выявления агента-преследователя $P_k \in M_2^j$ заключается в определении времени потенциальной встречи агента E_j с каждым из агентов множества M_2^j . В качестве агента-преследователя $P_k \in M_2^j$ выбирается агент, имеющий наименьшее расчетное время. Заметим, что здесь также возможен случай, когда существует два агента $P_k \in M_2^j$ и $P_{k+1} \in M_2^j$, имеющих одинаковое наименьшее расчетное время. Ясно, что в этом случае агент E_j находится в состоянии 1 (см. п. 2.2.2), и при этом его направление движения и скорость в следующий момент времени полностью определяются текущими значениями этих параметров.

Отметим, что множество M_2^j *обязательно содержит* всех фактических агентов-преследователей убегающего E_j , находящихся в его зоне наблюдения. Вместе с тем, убегающие, формируя предположения с помощью данных методов, могут ошибаться, поскольку в попутном направлении с каждым из них могут двигаться и отдельные агенты P_m ($P_m \notin M_2^j$), также влияющие на характер движения убегающего E_j . Однако, как следует из результатов компьютерного моделирования, постепенно в ходе процесса преследования/убегания предположения убегающих об их фактических преследователях становятся все более достоверными.

2.4. Метод перегруппировки агентов-преследователей. Данный метод использует отдельные результаты, вычисляемые в процессе выполнения метода формирования множества M_2^j (см. п. 2.3.1), касающиеся определения *времени перехвата*, которое затратил бы каждый агент-преследователь $P_i \in M_2^j$ на преодоление расстояния от его текущей дислокации до точки потенциальной встречи с агентом-убегающим E_j (в п. 2.3.1

ети данні формуються для визначення часу потенційної зустрічі E_j і $P_i \in M_2^j$).

На основі цих даних агент-преследователь $P_i \in Gr_k$ в кожен момент часу $t > 0$ свого руху аналізує поточний стан для виявлення ситуації, коли час перехвату певного агента-убігаючого $E_r \in Gr_s$ буде менше часу перехвату агента-убігаючого $E_j \in Gr_k$. Додатковим ознакою такої ситуації є те, що при цьому повинно виконуватися умова $P_i \in M_2^j \cap M_2^r$, що означає, що для переходу до переслідування агента-убігаючого E_r агенту P_i не потрібно змінювати свого поточного напрямку руху. Якщо така ситуація виявляється, то агент-преследователь P_i вступає в процес переговорів, генеруючи пропозицію для агентів-преследователів групи Gr_s про можливість швидшого захоплення агента $E_r \in Gr_s$, і пропонує їм розглянути можливість передачі власних повноважень по захопленню своєї цілі (агента-убігаючого $E_j \in Gr_k$). В свою чергу, реагуючи на це пропозицію, агенти-преследователі групи Gr_s таким же чином, як і агент P_i , аналізують поточну ситуацію. Якщо знайдеться певний агент $P_m \in Gr_s$, для якого така ситуація відповідає всім вищевказаним вимогам, то він приймає це пропозицію і відбувається взаємний перехід агентів P_i і P_m відповідно в групи Gr_s і Gr_k (згадаємо, що якщо претендентів на роль агента P_m декілька, то вибирається той, у якого час перехвату агента E_j найменший). В протилежному випадку пропозиція відхиляється.

Як показують результати комп'ютерного моделювання, описаний метод в ряді випадків дозволяє суттєво скоротити час захоплення убігаючих (див., наприклад, розд. 3 статті).

3. Прототип мультиагентної системи «Навігація»

На основі розроблених методів створено прототип мультиагентної системи «Навігація» (МАС Навігація) [10], реалізований на мові PDC Visual Prolog 5.2.

Для забезпечення адекватного відображення особливостей виконання вищевказаних методів, в МАС Навігація реалізовані відповідні рішення по підтримці автоматичного ведення в реальному масштабі часу трьох типів протоколів: протоколу передбачень убігаючих, протоколу дій агентів і протоколу реєстрації переговорів преследователів. Кожен з цих протоколів забезпечує відображення різних аспектів поведінки агентів в часі і реалізується засобами відповідних вікон (див. рис. 3), відкриваних за бажанням користувача.

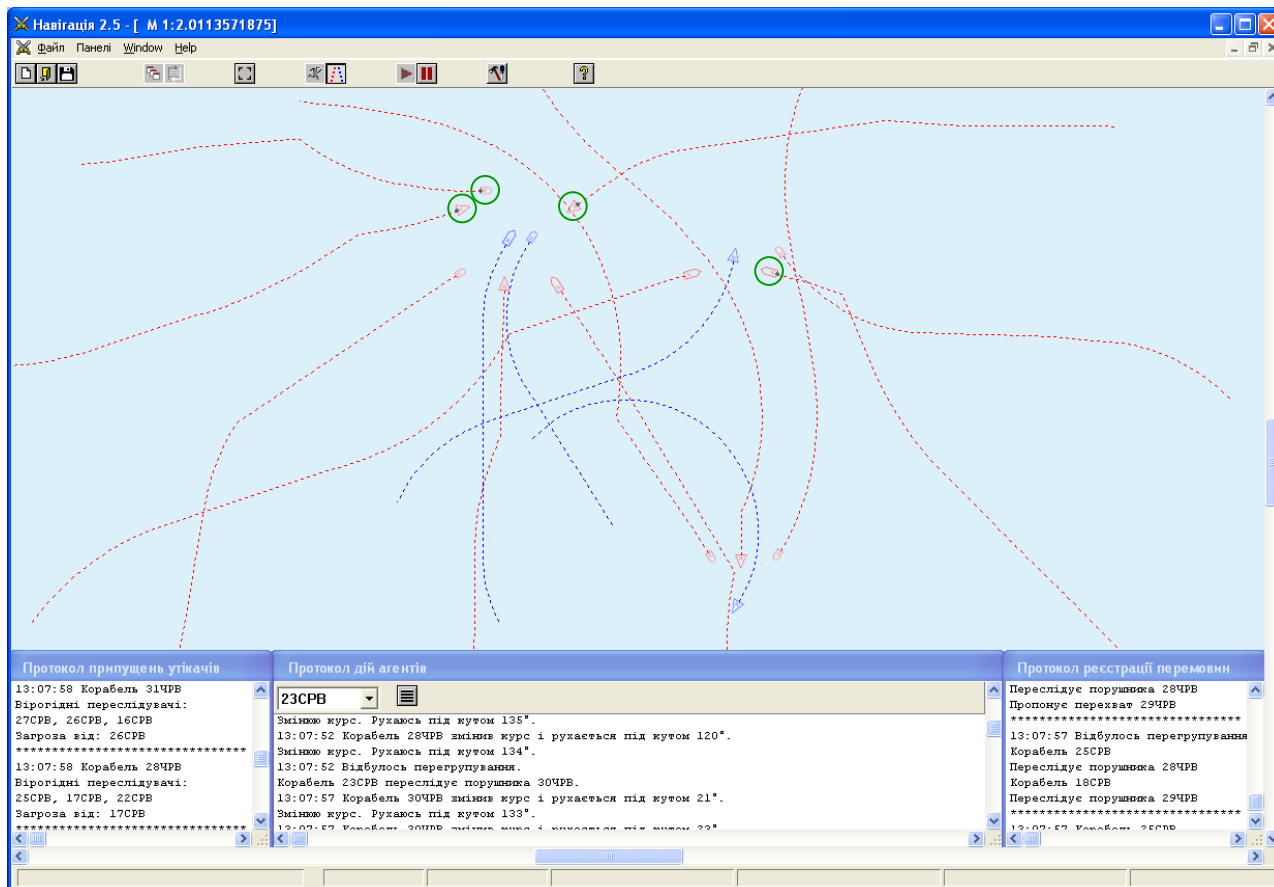


Рис. 3. Приклад функціонування МАС Навігація

Приведенный пример наглядно демонстрирует преимущества использования метода перегруппировки агентов в процессе моделирования преследования на плоскости (на рис. 3 перегруппировавшиеся агенты-преследователи обведены кружками): благодаря этому методу время захвата агентов-убегающих сократилось на 33% по сравнению со случаем, когда агенты-преследователи не выполняли перегруппировки.

Выводы

Проведенные исследования подтверждают эффективность использования мультиагентного подхода для решения задач преследования на плоскости. Как показано в статье, благодаря разработанным методам, реализованным в МАС Навигация, ее средствами обеспечивается моделирование процессов поведения агентов для общего случая (n ($n \geq 1$) убегающих и m ($m \geq 1$) преследователей, где $m \geq n$).

Дальнейшие исследования предполагают разработку методов маневрирования агентов для общего случая (с реализацией их в МАС Навигация) и интеграцию МАС Навигация с геоинформационной системой «ДЕКАРТ» [11] (ГИС ДЕКАРТ). ГИС ДЕКАРТ ориентирована на использование картографических БД формата ГИС ArcGIS. Отметим, что создание ГИС ДЕКАРТ основывалось на новой концепции «динамической электронной карты», благодаря которой средствами ГИС ДЕКАРТ обеспечивается представление и обработка в реальном масштабе времени динамических объектов различной природы.

1. Петросян Л.А., Томский Г.В. Геометрия простого преследования. – Новосибирск: Наука, 1983. – 140 с.
2. Петросян Л.А., Рихиев Б.Б. Преследование на плоскости. – М.: Наука, 1991. – 91 с.
3. Айзекс Р. Дифференциальные игры. – М.: Мир, 1967. – 479 с.
4. Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
5. Куркоткин В.И., Стерлигов В.Л. Самонаведение ракет. – М.: ВоенИздат, 1963. – 89 с.
6. Локк А.С. Управление снарядами. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. – 775 с.
7. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. – М.: ВоенИздат, 1991. – 343 с.
8. Яловець А.Л. Про один метод переслідування на площині // Проблеми програмування. – 2013. – № 3. – С. 117–124.
9. Яловець А.Л. Про метод найближчої точки як метод управління стратегіями переслідування/ уткання агентів // Проблеми програмування. – 2013. – № 4. – С. 94–99.
10. Яловець А.Л., Кондращенко В.Я., Арістов В.В. Свідоцтво № 46897 про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма – «Мультиагентна система «Навігація», версія 2.0»». Державна служба інтелектуальної власності України, 2012.
11. Яловець А.Л., Кондращенко В.Я., Арістов В.В. Свідоцтво № 52935 про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма – «Геоінформаційна система «ДЕКАРТ», версія 1.0»». Державна служба інтелектуальної власності України, 2014.