

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТСРОЧКИ ПОИМКИ ЦЕЛИ В АДТ-ИГРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОГО ИЛИ ДВУХ ЗАЩИТНИКОВ[#]

А. А. Галяев*, А. С. Самохин**, М. А. Самохина***

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

*✉ galaev@ipu.ru, ** ✉ samokhin@ipu.ru, ***✉ ph@ipu.ru

Аннотация. Рассматривается вариант Attacker-Defender-Target задачи с одним или двумя защитниками в плоской постановке. Предполагается, что цель и защитники движутся прямолинейно с постоянной скоростью, атакующий движется по догонной траектории без ограничения на радиус кривизны. Скорость защитников меньше скорости цели, скорость атакующего – больше. Смысл использования защитников заключается в том, чтобы атакующий вначале занимался их перехватом, и только после этого переключался на преследование основной цели. Тем самым время перехвата основной цели увеличивается, и она может стать недостижима для имеющего ограниченный запас топлива атакующего. Оптимизируются углы и времена выпуска защитников, в том числе рассматривается вариант выпуска защитников с одной стороны от цели. Исследование осуществляется для различных моделей работы системы самонаведения автономного атакующего аппарата: движения к центру масс всех преследуемых объектов, к ближайшей цели по расстоянию или по угловой дальности. Проведено численное моделирование, показывающее важность выбора угла выпуска защитников, целесообразность использования второго защитника, получены сценарии, в которых использование защитников делает основную цель недостижимой для атакующего.

Ключевые слова: преследование, система самонаведения, использование защитников, автономный аппарат, оптимизация, численное моделирование, перехват, АДТ.

ВВЕДЕНИЕ

Групповое противодействие автономным аппаратам, решающим различные целевые задачи, становится все более и более актуальным на текущем уровне развития интеллектуальных алгоритмов и технологий. В последнее время появились публикации, рассматривающие так называемые MDT-игры (Missile-Target-Defender), или по-другому – АДТ-игры (Attacker-Defender-Target), «атакующий – защитник – цель» [1–6]. В подобных задачах коалиция цель – защитник (защитники) играет против атакующего цель игрока. Задача защитника – перехватить атакующего игрока и не допустить его встречи с целью. Цель при этом совер-

шает маневр уклонения. В качестве защитника могут выступать как ударное мобильное средство типа антиракеты, так и ложная цель-имитатор, отвлекающая на себя атакующего игрока [2].

Обзор методов определения управления для каждого из агентов в АДТ-играх приведён в статье [3]. Управление может определяться на основе как нейросетевых [3, 4], так и классических подходов. В работе [3] отмечается, что нейросетевые подходы пока удаётся применять только в относительно простых постановках, и осуществляется попытка развития данной методики с использованием результатов, полученных на основе теории дифференциальных игр.

В статье [5] удалось решить задачу геометрически – найти управление, при котором защитник, более манёвренный, чем цель, гарантированно оказывается на пути движения атакующего к цели.

[#] Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00134).

В работах [6–8] АДТ-игры исследуются на основе теории дифференциальных игр, в них также рассматривается случай защитника, движущегося быстрее цели.

Большинство работ посвящено анализу ситуации с одной целью, одним защитником и одним атакующим. Но в статьях [8, 9] получены результаты в ситуации сразу с двумя атакующими. В публикации [9] для этого решается уравнение Риккати и проведено нелинейное численное моделирование. В работе [10] рассмотрен случай сразу нескольких преследователей, осуществлено моделирование для сценария, когда их не более пяти. В статье [11] исследовалась дифференциальная игра с несколькими нападающими, несколькими защитниками и неподвижной целью.

В настоящей работе рассматривается задача «атакующий – защитник – цель» в плоской постановке. В упомянутых выше статьях предполагается наличие одного защитника или неподвижность цели, в текущем же исследовании рассматривается возможность выигрыша при использовании двух защитников, движущихся медленнее перемещающейся цели. При этом для цели и защитников рассматривается упрощённая динамика прямолинейного движения с постоянной скоростью, а для атакующего не учитывается ограничение на минимальный радиус кривизны траектории.

Другой особенностью рассматриваемой более прикладной постановки является отсутствие у атакующего полной информации об игре и использование известного всем игрокам закона самонаведения.

Отдельно исследуются случаи одного и двух защитников. При этом считается, что защитники двигаются медленнее цели, а атакующий – быстрее. Предполагается, что запас хода атакующего конечен, преследование осуществляется в течение ограниченного времени. Защитники представляют собой ложные цели и действуют в коалиции с основной целью. Задача защитников – отвлечь внимание атакующего на себя, дав возможность цели уйти от преследования.

Атакующий, цель и защитник представлены автономными аппаратами. Цель и защитники движутся равномерно прямолинейно, при этом траектория движения цели задана, а траектории движения защитников являются объектом исследования.

Предполагается, что автономный атакующий аппарат перемещается также с постоянной скоростью, но оснащён системой самонаведения (СН) и двигается по более сложной траектории. Вначале

атакующий движется к центру масс всех видимых объектов, осуществляя совместное преследование, далее он преследует объекты отдельно, по очереди, пока не поразит основную цель или пока у него не закончится топливо. Очередность выбирается, исходя из расстояния или угловой дальности до объектов, и может меняться в ходе преследования.

При движении атакующий использует пропорциональную навигацию (англ. *Proportional Navigation*, PN) – достаточно эффективный закон наведения, который используется в той или иной форме в большинстве самонаводящихся автономных аппаратов [12–14]. Согласно PN вектор скорости атакующего должен вращаться со скоростью, пропорциональной скорости вращения линии визирования и в том же направлении.

Считается, что на некотором расстоянии до защитника атакующий распознаёт, что перед ним находится не основная цель, и переключается на преследование следующего объекта.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Описание сценария атаки и ухода от перехвата

В работе рассматривается случай атаки одиночного атакующего на цель, оснащённую одним или двумя защитниками – ложными целями. Атакующий, цель и защитники представляют собой материальные точки. Случай одного защитника далее рассматривается в § 2, двух – в § 3. Атака начинается в момент времени $t=0$. Обозначим через $d(t)$ расстояние от атакующего до основной цели в момент времени t . Тогда в начальный момент времени расстояние между атакующим и целью задано: $d(0) = \text{const}$. Цели известны о начале атаки. Время атаки ограничено заданной величиной τ_{\max} , после чего считается, что у атакующего не остаётся топлива для дальнейшего преследования.

Предлагаемая тактика защиты состоит в мгновенном запуске целью защитника, который должен отвлечь СН атакующего автономного объекта, тем самым дав возможность цели уйти от поражения атакующим. Отдельно рассматривается случай, когда у цели есть второй защитник, который либо выпускается одновременно с первым в начальный момент времени, либо оптимизируется время его выпуска, а также исследуется ситуация, при которой защитников можно выпускать только с одной стороны от цели.

1.2. Модель движения автономных аппаратов

В задаче перехвата важно соотношение скоростей рассматриваемых объектов. Скорость атакующего v_A выше скорости цели v_T и скорости ложных целей – защитников v_D , скорость цели выше скорости защитников.

Так как скорость атакующего больше скоростей цели и защитников, то атакующий догонит цель за конечное время. Расчёты проводятся до момента τ поимки атакующим основной цели, при этом во время моделирования предполагалось, что запас хода атакующего неограничен, но если в результате оказывается, что $\tau > \tau_{\max}$, то считается, что цели удалось успешно уклониться от атаки.

Атакующий осуществляет перехват выбранной цели согласно закону пропорциональной навигации: $\Delta\theta = k\Delta\lambda$, где θ – угол поворота вектора скорости атакующего, λ – угол визирования цели, а k – коэффициент пропорциональности. В работе полагалось, что $k = 1$.

На рис. 1 изображена начальная конфигурация. Начало координат в момент старта атаки $t = 0$ совпадает с положением цели. Ось абсцисс направлена перпендикулярно вектору, соединяющему атакующего и цель в начальный момент времени. От неё в положительном направлении отсчитываются углы движения цели γ_T и защитников γ_{D1}, γ_{D2} .

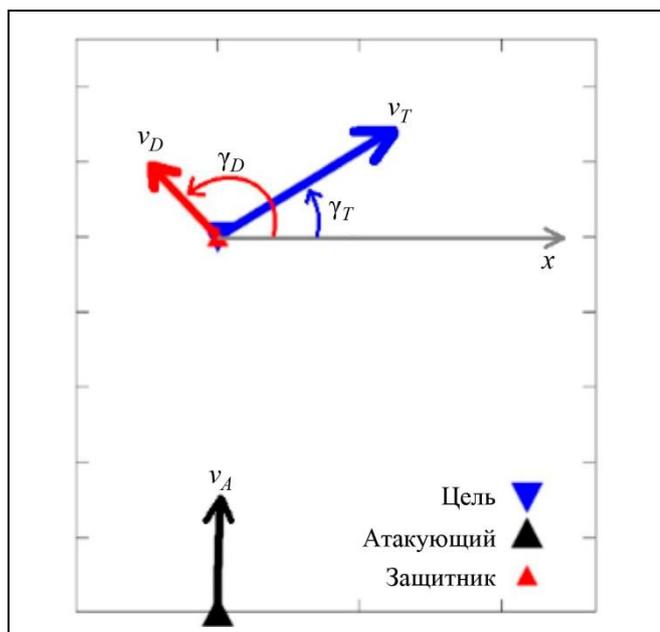


Рис. 1. Схема начальной конфигурации: расположение и направление движения атакующего, цели, защитника в момент начала атаки

В декартовой системе координат движение цели описывается соотношениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_T = v_T \cos(\gamma_T), \\ \dot{y}_T = v_T \sin(\gamma_T), \end{cases}$$

где $(x_T(t), y_T(t)) = \mathbf{r}_T(t)$ — координаты цели в момент времени t , при этом $x_T(0) = y_T(0) = 0$.

Движение защитников описывается аналогичными соотношениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_{D_i} = v_D \cos(\gamma_{D_i}), \\ \dot{y}_{D_i} = v_D \sin(\gamma_{D_i}), \end{cases}$$

где $i = 1$ или 2 ; $(x_{D_i}(t), y_{D_i}(t)) = \mathbf{r}_{D_i}(t)$ – координаты i -го защитника в момент времени t , при этом $x_{D_1}(0) = y_{D_1}(0) = 0$, так как первый защитник выпускается сразу в момент начала атаки, координаты второго защитника D_2 , в случае его наличия, в момент времени τ его выпуска совпадают с координатами цели: $x_{D_2}(\tau_D) = x_T(\tau_D)$, $y_{D_2}(\tau_D) = y_T(\tau_D)$.

Цель и защитники движутся прямолинейно, в одном сценарии углы γ_T и γ_{D_i} являются константами.

Обозначим через $\mathbf{r}_A(t)$ положение атакующего в момент времени t , тогда закон управления атакующего при движении по догонной траектории записывается следующим образом:

$$\dot{\mathbf{r}}_A(t) = v_A(t) \frac{\hat{\mathbf{r}}(t) - \mathbf{r}_A(t)}{|\hat{\mathbf{r}}(t) - \mathbf{r}_A(t)|}. \quad (1)$$

Здесь $\hat{\mathbf{r}}(t)$ – положение выбранной для преследования цели.

Предполагается, что вначале атакующим осуществляется совместное преследование, при котором $\hat{\mathbf{r}}(t)$ – центр масс основной цели T и защитников, т. е. $\hat{\mathbf{r}}(t) = \frac{1}{2}(\mathbf{r}_T(t) + \mathbf{r}_{D_1}(t))$ в случае одного

выпущенного защитника и $\hat{\mathbf{r}}(t) = \frac{1}{3}(\mathbf{r}_T(t) + \mathbf{r}_{D_1}(t) + \mathbf{r}_{D_2}(t))$ в случае двух выпущенных защитников. В момент, когда расстояние от атакующего до центра масс равно расстоянию между целью и одним из защитников, групповое преследование заканчивается и начинается поочередное преследование.

Цель коалиции основной цели и защитников – добиться того, чтобы ни в один момент времени $\tilde{t} \in [0, \tau_{\max}]$ не было выполнено равенство $\mathbf{r}_T(\tilde{t}) = \mathbf{r}_A(\tilde{t})$, означающее перехват цели атакующим.

При моделировании в § 2, 3 для расчётов брались следующие величины, приведённые к безраз-

мерному виду, для скоростей агентов, начального расстояния от атакующего до цели и максимально допустимого времени перехвата:

$$\begin{cases} v_D = 0,3, \\ v_T = 0,6, & d(0) = 10, \quad \tau_{\max} = 30. \\ v_A = 0,9, \end{cases}$$

В работе рассматриваются различные фиксированные значения γ_T , требуется найти угол выпуска одного защитника γ_{D1} или двух – γ_{D1} и γ_{D2} и время выпуска второго защитника τ_D , максимизирующие время перехвата атакующим основной цели $\tau \rightarrow \max$. Параметры оптимизации будут уточнены для каждого пункта § 2 отдельно.

2. СЛУЧАЙ ОДНОГО ЗАЩИТНИКА

В § 2 и 3 представлены результаты численного моделирования для различных сценариев: атаки под разным углом, одного или двух защитников, оптимизации времени выпуска второго защитника. Для проведения расчётов был реализован программный комплекс на языке С. При моделировании использовалась сетка в пространстве параметров задачи, применялся метод градиентного спуска, было проведено параметрическое исследование. Интегрирование траектории атакующего осуществлялось с контролем относительной локальной погрешности [15, 16].

На рис. 3–7 чёрным цветом показана траектория атакующего $\mathbf{r}_A(t)$, синим – цели $\mathbf{r}_T(t)$, красным – защитников $\mathbf{r}_{Di}(t)$. Траектории представлены в декартовой системе координат. Треугольниками соответствующих цветов отмечены положения атакующего, цели, защитника в начальный момент времени. Жирными точками тех же цветов на траекториях атакующего, цели и защитника отмечены их положения в момент окончания группового преследования, а зелёным квадратом – центр масс цели и защитника в этот момент времени. Окружностями отмечены позиции атакующего и первого защитника в момент времени τ_D выпуска второго защитника.

2.1. Выбор оптимального угла выпуска защитника

В случае наличия только одного защитника, выпускаемого в начальный момент времени, оптимизируемым функционалом является

$$\tau \rightarrow \max_{\gamma_{D1}} \quad (2)$$

Важность выбора угла выпускаемого защитника в этом случае показана на рис. 2. Сплошная кривая соответствует преследованию вначале защитника, затем цели, штриховая – случаю, в котором после движения к центру масс атакующий сразу выбирает преследование основной цели.

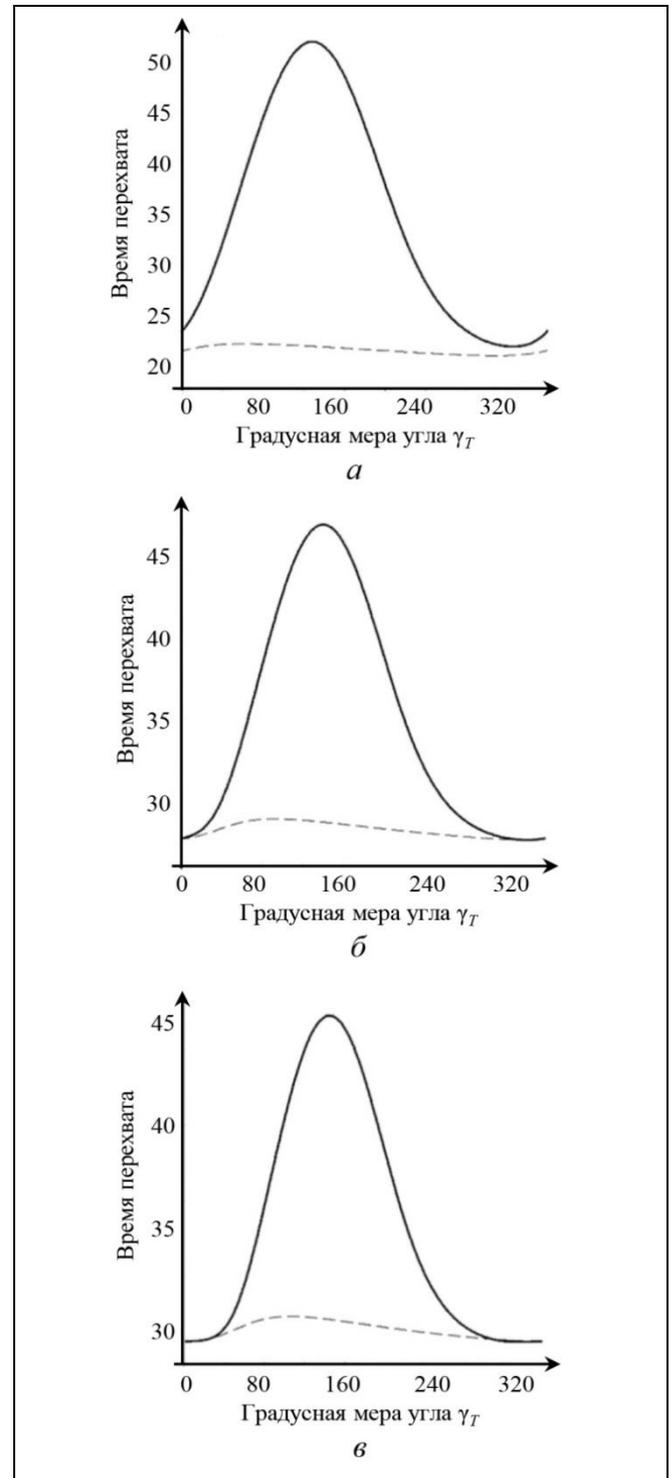


Рис. 2. Увеличение времени перехвата в зависимости от угла выпуска защитника γ_{D1} для разных углов движения цели: а – $\gamma_T = 0$, б – $\gamma_T = 30^\circ$, в – $\gamma_T = 45^\circ$



В случае, изображённом на рис. 2, а, оптимальным углом выпуска защитника оказывается $\gamma_{D1} = 128,7^\circ$, время перехвата цели τ увеличивается с 20 до 51,5; в случае, изображённом на рис. 2, б, $\gamma_{D1} = 140,5^\circ$, время перехвата цели τ увеличивается с 26,6 до 47,7; в случае, изображённом на рис. 2, в, $\gamma_{D1} = 146^\circ$, время перехвата цели τ увеличивается с 29,4 до 45,4.

Отметим, что без защитника во всех этих случаях атакующий успешно перехватывает цель в течение времени, на которое у него хватает энергоресурса: $\tau_{\max} = 30$. В случае же использования защитника повышаются шансы на то, что за время жизни атакующего ему не удастся перехватить цель.

2.2. Траектории движения для оптимальных значений углов выпуска защитника

Соответствующие лучшим полученным углам γ_{D1} траектории движения атакующего, цели и защитника приведены на рис. 3. Они построены с использованием упрощённого закона движения атакующего по догонной траектории (1), при этом по-прежнему рассматривается функционал (2).

В случае, изображённом на рис. 3, а, для $\gamma_T = 0^\circ$ групповое преследование заканчивается при $t = 6,29$, когда расстояние от атакующего до центра масс равно расстоянию между целью и защитником и составляет 5,17. Атакующий достигает области распознавания ложности защитника в момент времени $t = 14,51$, на момент $t = 30$ окончания энергоресурса у атакующего расстояние до цели составляет 6,48.

В случае, изображённом на рис. 3, б, для $\gamma_T = 30^\circ$ групповое преследование заканчивается при $t = 7,11$, когда расстояние от атакующего до центра масс равно 5,40. Защитник настигается в момент времени $t = 14,12$, дистанция до цели в конце составляет $d(30) = 5,33$. В случае, изображённом на рис. 3, в, $\gamma_T = 45^\circ$, групповое преследование заканчивается при $t = 7,57$, когда расстояние от атакующего до центра масс равно 5,45. Атакующий распознает в защитнике ложную цель в момент времени $t = 13,88$, при $t = 30$ расстояние до цели $d(30) = 4,65$.

Тем самым выбор правильного угла выпуска защитника γ_{D1} может существенно увеличить время перехвата основной цели. Для увеличения вероятности неуспеха атакующего целесообразно задействовать нескольких защитников.

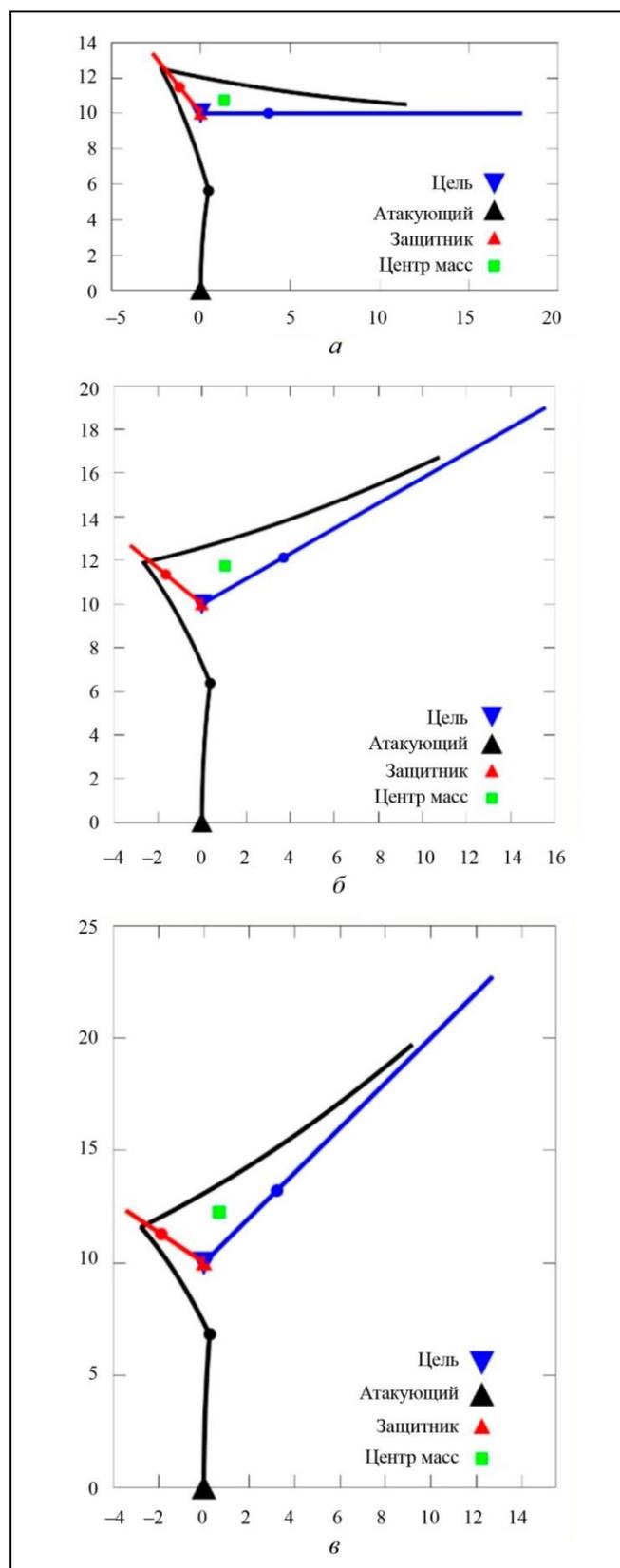


Рис. 3. Траектории движения атакующего (чёрная линия), цели (синяя линия), защитника (красная линия), соответствующие лучшему углу γ_{D1} выпуска защитника (см. рис. 2) при преследовании атакующим вначале центра масс защитника и цели, затем защитника, затем цели: а – $\gamma_T = 0^\circ$, б – $\gamma_T = 30^\circ$, в – $\gamma_T = 45^\circ$

3. СЛУЧАЙ ДВУХ ЗАЩИТНИКОВ

3.1. Случай $\gamma_T = 0$

На рис. 4 приведены траектории с двумя защитниками, рассматривается случай $\gamma_T = 0$. Атакующий вначале преследует центр масс объекта и защитников, затем переходит к поочередному преследованию ближайших целей.

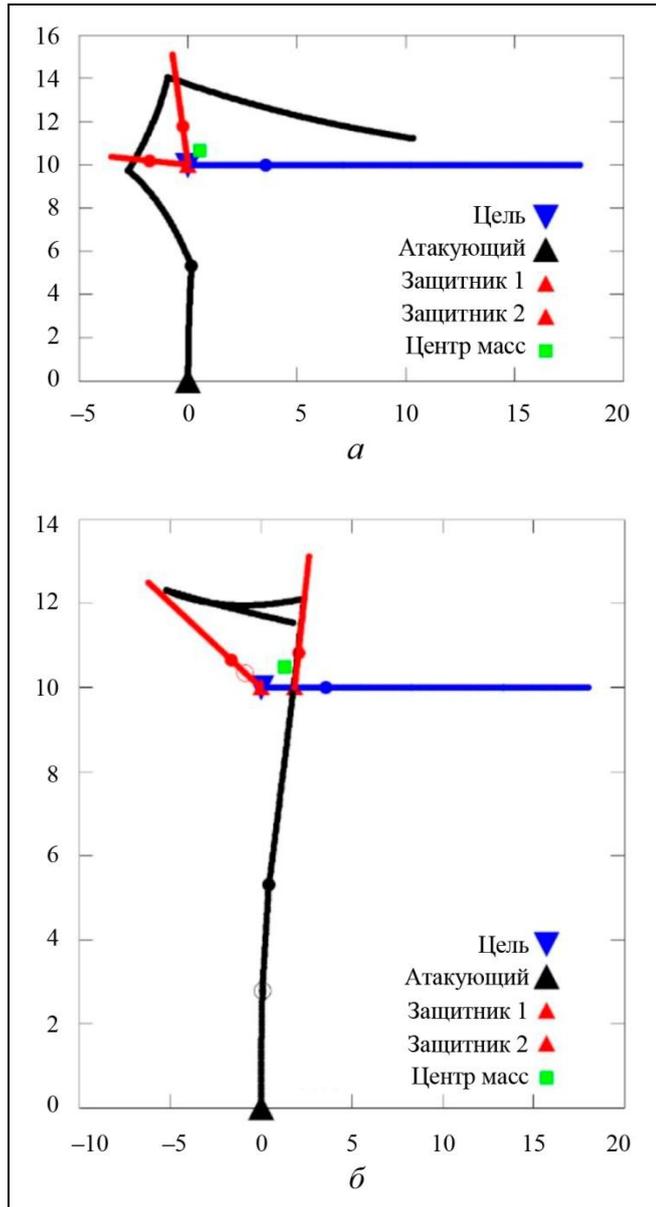


Рис. 4. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие: а – лучшему углу выпуска второго защитника γ_{D2} , б – лучшему углу выпуска обоих защитников γ_{D1} и γ_{D2} и лучшему времени старта второго защитника τ_D

На рис. 4, а оба защитника выпускаются в начальный момент времени, задача решается с

функционалом $\tau \rightarrow \max_{\gamma_{D1}, \gamma_{D2}}$. Первый защитник выпущен под углом $\gamma_{D1} = 174^\circ$, тогда оптимальным углом выпуска второго защитника оказывается $\gamma_{D2} = 98^\circ$, время перехвата цели при этом составит $\tau = 56$. На момент окончания энергоресурса у атакующего при $t = 30$ расстояние до цели $d(30) = 7,77$.

На рис. 4, б рассматривается случай $\gamma_T = 0$, угол выпуска первого защитника γ_{D1} , время τ_D и угол выпуска γ_{D2} второго защитника оптимизируются, т. е. решается задача

$$\tau \rightarrow \max_{\gamma_{D1}, \gamma_{D2}, \tau_D} \quad (3)$$

В этом случае время перехвата составит 84,6, что превышает запас энергоресурса атакующего, угол выпуска первого защитника 158° , второго – 76° . Второго защитника лучше всего выпустить через время $\tau_D = 3,1$ после начала атаки. В этом случае атакующий вначале попытается перехватить второго защитника, затем отправится на перехват первого, так как в момент распознавания во втором защитнике ложной цели первый защитник окажется ближе к атакующему, чем основная цель. И только после определения первой цели как ложной атакующий отправится на перехват основной цели. При этом в момент окончания энергоресурса у атакующего расстояние до цели $d(30) = 16,32$.

На рис. 5–7 представлены результаты моделирования в течение времени τ_{\max} с двумя защитниками для $\gamma_T = 30$ (графики слева) и $\gamma_T = 45^\circ$ (графики справа). Время выпуска второго защитника, углы выпуска первого и второго защитников также оптимизируются. Угол движения цели γ_T задан, первый защитник выпускается в начальный момент времени.

Защитники отмечены красным цветом и перестают отображаться в момент их распознавания в качестве ложной цели. Время перехвата получено численным моделированием развития обстановки до момента перехвата, на графиках сам перехват не отражён, так как моделирование проводится до времени $t = 30$ окончания энергоресурса атакующего. При запасе энергоресурса атакующего лишь на время движения $\tau_{\max} = 30$ перехват в данных сценариях при использовании защитников невозможен.

В подписях ко всем графикам указаны время перехвата τ углы выпуска защитников γ_{D1} и γ_{D2} , время выпуска второго защитника τ_D , расстояние от атакующего до цели $d(30)$ в момент заверше-



ния сценария – когда у атакующего заканчивается энергоресурс.

Далее в п. 3.2 рассматриваются функционал и параметры оптимизации (3).

3.2. Случаи $\gamma_T = 30^\circ$ и $\gamma_T = 45^\circ$

3.2.1. Движение атакующего к ближайшему объекту

В начале траектории в каждом случае атакующий некоторое время движется к центру масс всех видимых объектов, затем при существенном удалении их друг от друга выбирает для преследования одну из целей. В случае обнаружения атакующим во время движения более удобной в некотором смысле цели или опознания текущей цели в качестве ложной он переключается на следующую цель, которая в рассматриваемых моделях определяется разными алгоритмами; результаты их работы приведены на графиках далее.

При движении атакующего к ближайшему объекту получаются траектории, представленные на рис. 5, а, с временем перехвата основной цели $\tau = 79,3$ и рис. 5, б с временем перехвата $\tau = 76,3$. Второй защитник при этом позволяет

существенно увести атакующего от цели после распознавания атакующим первого защитника и время перехвата получается значительно больше, чем в случае наличия одного защитника. Однако такие траектории не очень реалистичны, так как в момент распознавания первого защитника основной объект находится в поле зрения атакующего, а второй защитник – вне его, поэтому атакующий должен продолжить движение именно к основному объекту. Учёт поля зрения атакующего представлен в п. 3.2.2.

3.2.2. Учёт зоны видимости атакующего

Здесь представлен сценарий, в котором атакующий при принятии решения, к какой цели далее двигаться после этапа совместного преследования, определяет ближайшую цель в своей зоне видимости – внутренних точках угла градусной меры L , содержащего вектор скорости атакующего и симметричного относительно него. Если же в зоне видимости целей нет, то атакующий отправляется преследовать цель, ближайшую по угловому расстоянию к зоне видимости, а не по абсолютному расстоянию на плоскости.

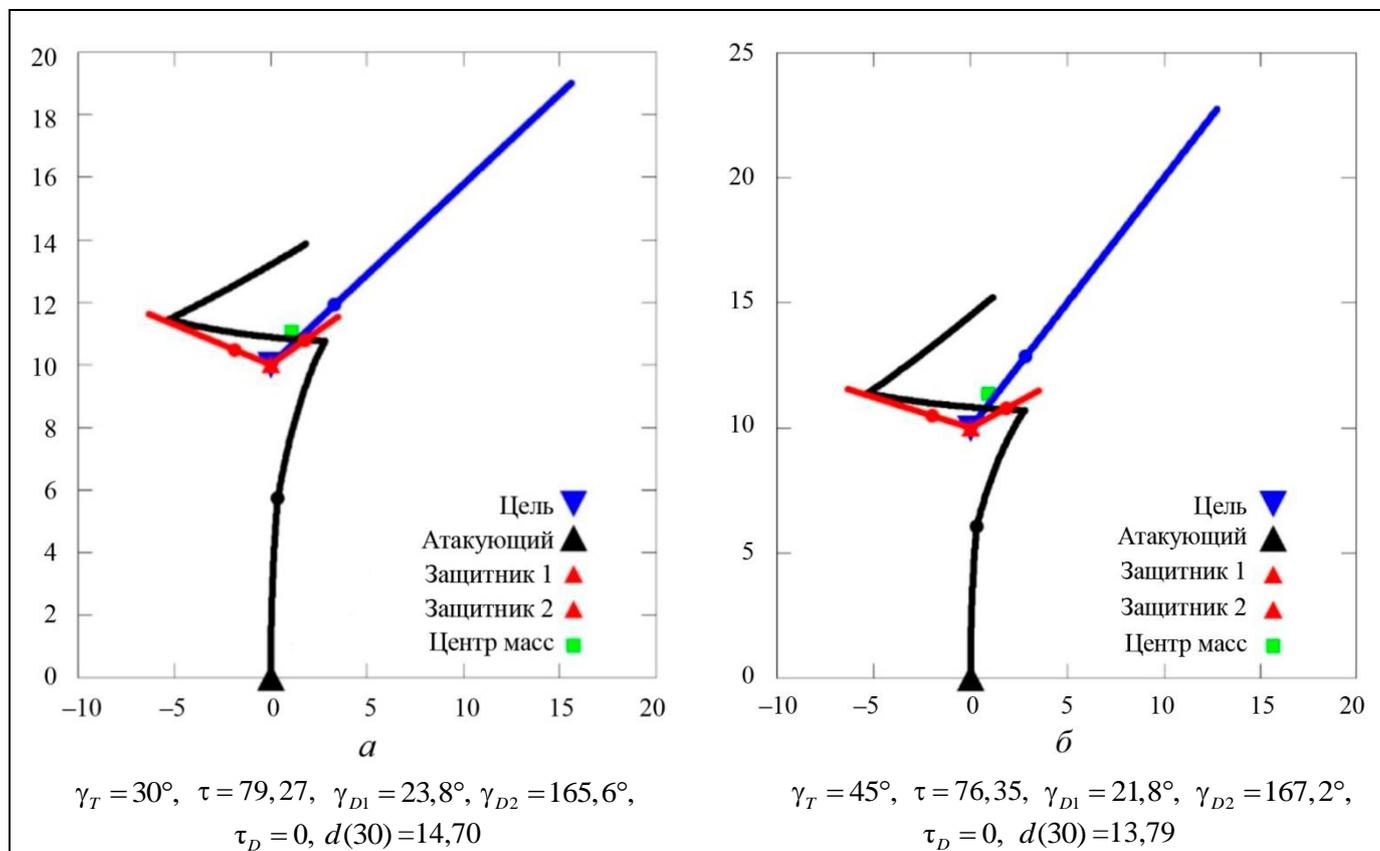


Рис. 5. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие движению атакующего к ближайшему объекту

Результаты моделирования такого сценария поведения представлены на рис. 6 и 7. Вначале атакующий некоторое время движется к центру масс всех видимых объектов, после чего начинает движение к ближайшему объекту в поле видимости,

который определяется на каждом такте наблюдений. При этом если в поле видимости находится только один объект, то атакующий движется к нему, как бы далеко он ни был, не переключаясь на близкие по расстоянию объекты, находящиеся

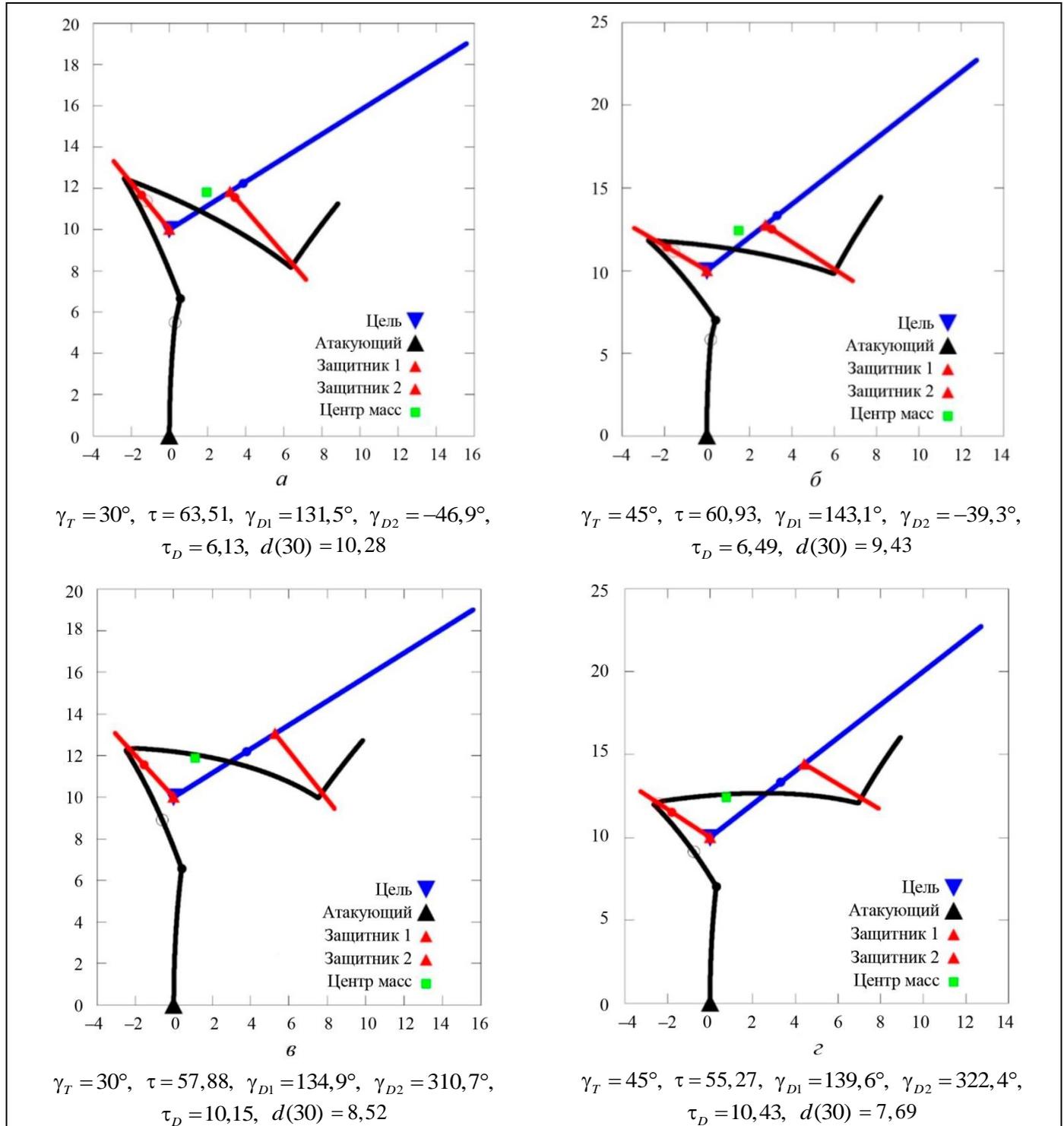


Рис. 6. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие движению атакующего: *a, б* – к ближайшему объекту в зоне видимости $L < 30^\circ$; *в, г* – после опознания первого защитника к ближайшему объекту в зоне видимости $L < 30^\circ$ и при смене курса с цели на другого защитника только в том случае, если он в какой-то момент, не ранее чем через время $\Delta t = 0,5$ после опознания первого защитника в качестве ложной цели, окажется ближе основной цели к атакующему и будет находиться в зоне $L < 15^\circ$



вне зоны видимости. Оказывается, и в этом более реалистичном случае защитники позволяют существенно увеличить время перехвата, делая его недостижимым для атакующего.

Характер траекторий на рис. 6, *a* и *б* похож. После опознания первого защитника в качестве ложной цели атакующий переключается на основной объект. Но при движении в сторону основного объекта практически сразу внутри зоны видимости атакующего $L < 30^\circ$ близко к угловой границе этой зоны обнаруживается второй защитник. При этом второй защитник находится ближе основной цели, поэтому атакующий резким поворотом переключается на него, и только после распознавания второго защитника в качестве ложной цели отправляется к основной цели. На рис. 6, *a* рассматривается случай $\gamma_T = 30^\circ$, время перехвата составляет $\tau = 63,5$, что превышает запас энергоресурса атакующего, а также существенно больше времени перехвата при таком γ_T в случае наличия лишь одного защитника, составляющего $\tau = 47,7$. На рис. 6, *б* рассматривается случай $\gamma_T = 45^\circ$, время перехвата составит $\tau = 61$, что также превышает запас энергоресурса атакующего и больше времени перехвата при таком γ_T в случае лишь одного защитника, составляющего $\tau = 45,4$.

Случаи, изображённые на рис. 6, *в*, *г*, соответствуют переходу атакующим после опознания первого защитника к движению к ближайшему объекту в зоне видимости $L < 30^\circ$, а смена курса с выбранной цели на другого защитника возможна только в том случае, если этот защитник в какой-то момент, по прошествии как минимум $\Delta t = 0,5$ единиц времени с момента опознания первого защитника, окажется ближе к атакующему, чем выбранная основная цель, и будет находиться в более узкой зоне видимости атакующего $L < 15^\circ$. Данный случай соответствует более быстрому перехвату атакующим основной цели и более плавному повороту атакующего после распознавания первой цели, что также обеспечивается существенно более поздним выпуском второго защитника, для того чтобы он наблюдался атакующим внутри зоны видимости как можно дальше от её границы.

3.2.3. Выпуск защитников с одной стороны от цели

Случай, представленный на рис. 7, построен в предположениях, соответствующих рис. 6, *a*, *б*, однако добавлено условие выпуска всех защитников с одной стороны от цели, т. е. векторы скоро-

стей обоих защитников должны лежать в одной полуплоскости относительно прямой, по которой движется основная цель.

Получены два принципиально разных по виду семейства траекторий.

На рис. 7, *a*, *б* представлены лучшие по значению функционала траектории, на которых второй защитник выпускается через время $\tau_D = 4,5 \div 5$ после начала атаки и следует примерно в место старта цели, уводя атакующего к первому защитнику от уже ушедшей с этой позиции цели.

На рис. 7, *в*, *г* приведены траектории, соответствующие существенно отличным локально оптимальным семействам, на которых в область старта цели защитники не отправляются, при этом они лишь немного проигрывают по значениям функционала траекториям из случаев, изображённых на рис. 7, *a*, *б*. В случае, изображённом на рис. 7, *в*, $\gamma_T = 30^\circ$, атакующий сначала отправляется ко второму защитнику, затем к первому и потом уже к основной цели, время перехвата $\tau = 55,8$. В случае, изображённом на рис. 7, *г*, $\gamma_T = 45^\circ$, атакующий, напротив, сначала отправляется к первому защитнику, затем – ко второму и в последнюю очередь – к основной цели. В этом случае время перехвата минимально среди рассмотренных вариантов, $\tau = 47$, что всё равно не позволяет атакующему достигнуть цели. При этом на такой траектории происходит очень надёжное переключение атакующего с первого защитника на второго, так как в момент переключения второй защитник и цель находятся под очень близкими углами обзора для атакующего, но защитник при этом намного ближе к атакующему, чем цель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено моделирование перехвата атакующим цели в случае наличия у уходящей от преследования цели одного или двух защитников (ложных целей) при использовании различных правил преследования. Предполагалось, что основная цель и защитники движутся прямолинейно с постоянными скоростями. Углы выпуска защитников оптимизировались, также рассматривались задача оптимизации времени выпуска второго защитника и случай выпуска защитников с одной стороны от цели.

Реализован программный комплекс, симулирующий АДТ-игру, представлены результаты численных расчётов для разных моделей поведения

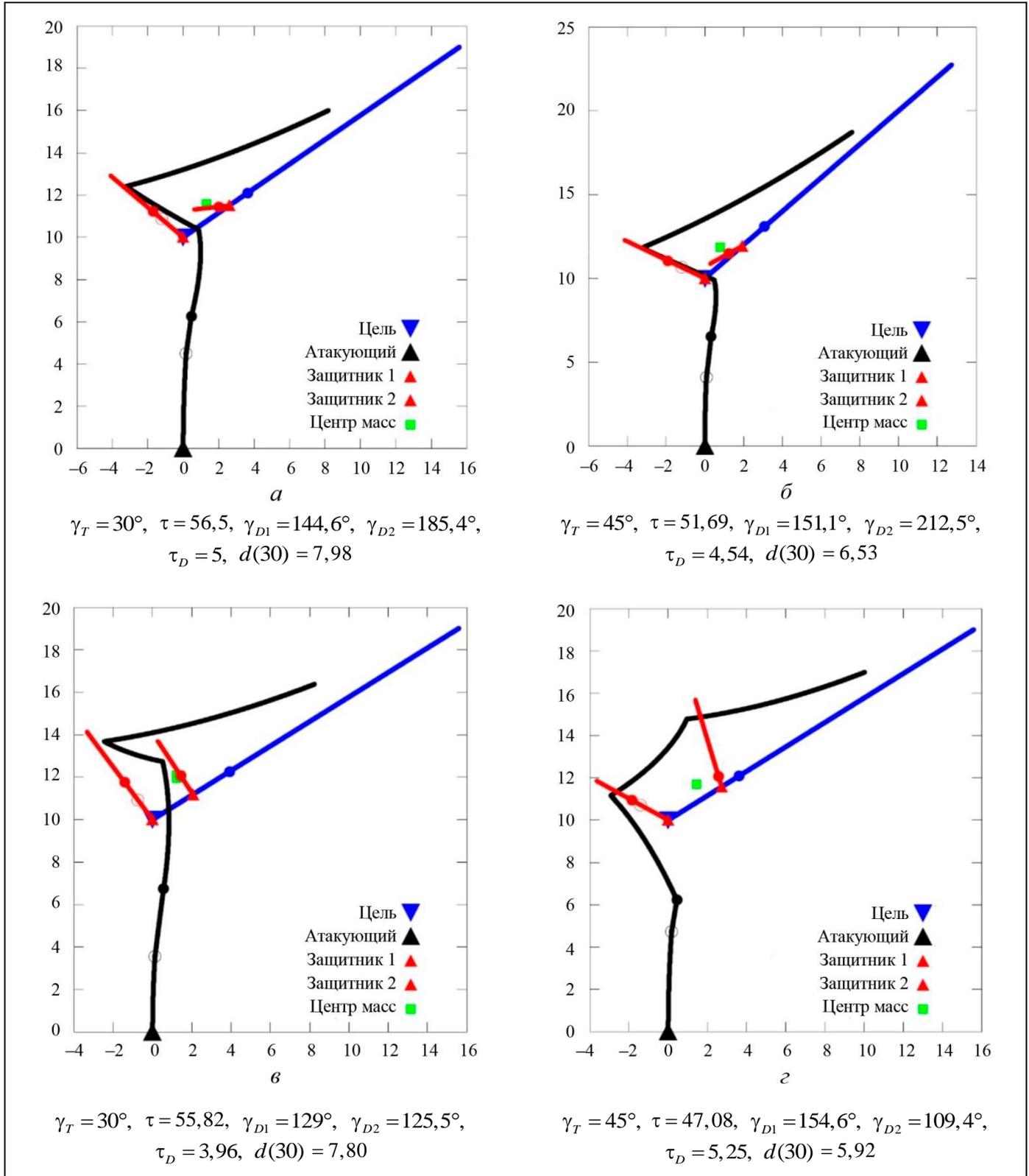


Рис. 7. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие выпуску обоих защитников с одной стороны от цели

атакующего: движения к ближайшей цели, ближайшей в зоне видимости цели, ближайшей в зоне видимости цели с дополнительными условиями на переключение с основной цели на защитника.

Показано, что во всех случаях наличие второго защитника целесообразно, так как при этом значительно увеличивается время перехвата по сравнению со случаем лишь одного защитника. Также



дополнительный защитник увеличивает вероятность выбора для промежуточного преследования именно одного из защитников вместо основной цели.

При заданных в рассмотренных моделях условиях по стартовым позициям, скоростям и запасу хода в случае отвлечения атакующего на защитников в работе удалось построить схемы выпуска защитников, при следовании которым атакующему не хватит запаса энергоресурса на поражение основной цели.

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований отметим рассмотрение большего числа защитников, а также более сложной динамики основной цели и защитников.

ЛИТЕРАТУРА

- García, E., Casbeer, D., Pachter, M. The Complete Differential Game of Active Target Defense // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2021. – Vol. 191. – P. 1–25. – DOI: 10.1007/s10957-021-01816-z.
- Zhan, K., Yu, B., Wang, J. Simulations of the Anti-Torpedo Tactic of the Conventional Submarine Using Decoys and Jammers // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – Vol. 65. – P. 165–168. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.65.165.
- Gong, X., Chen, W., Chen, Z. Intelligent Game Strategies in Target-Missile-Defender Engagement Using Curriculum-Based Deep Reinforcement Learning // Aerospace. – 2023. – Vol. 10, no. 2. – Art. no. 133. – DOI: 10.3390/aerospace10020133.
- Jacob, T.E., Jay, P.W. Defender-Aware Attacking Guidance Policy for the Target–Attacker–Defender Differential Game // Journal of Aerospace Information Systems. – 2021. – Vol. 18, no. 6. – P. 366–376. – DOI: 10.2514/1.1010877.
- Rubinovich, E.Ya. Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // Dynamic Games and Applications (Special Issue). – 2021. – Vol. 9, no. 17. – P. 851–857. – DOI: 10.1007/s13235-019-00297-0.
- García, E., Casbeer, D. W., Pachter, M. Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // IET Control Theory and Applications. – 2017. – Vol. 17, no. 11. – P. 2985–2993. – DOI: 10.1049/iet-cta.2017.0302.
- Alkather, D., Moshaiov, A. Game-Based Safe Aircraft Navigation in the Presence of Energy-Bleeding Coasting Missile // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2016. – Vol. 39. – P. 1539–1550. – DOI: 10.2514/1.G001676.
- Liu, F., Dong, X., Li, Q., Ren, Z. Cooperative differential games guidance laws for multiple attackers against an active defense target // Chinese Journal of Aeronautics. – 2022. – Vol. 35. – P. 374–389. – DOI: 10.1016/j.cja.2021.07.033.
- Liang, H., Wang, J., Liu, J., Liu, P. Guidance strategies for interceptor against active defense spacecraft in two-on-two engagement // Aerospace Science and Technology. – 2020. – Vol. 96. – Art. no. 105529. – DOI: 10.1016/j.ast.2019.105529.
- Zhou, Z., Zhang, W., Ding, J., et al. Cooperative pursuit with Voronoi partitions // Automatica. – 2016. – Vol. 72. – P. 64–72. – DOI: 10.1016/j.automatica.2016.05.007.
- Chen, M., Zhou, Z., Tomlin, C.J. Multiplayer reach-avoid games via pairwise outcomes // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2017. – Vol. 62, no. 3. – P. 1451–1457. – DOI: 10.1109/TAC.2016.2577619.
- García, E., Casbeer, D., Pham, Kh., Pachter, M. Cooperative Aircraft Defense from an Attacking Missile using Proportional Navigation // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. – Kissimmee, Florida, 2015. – P. 2926–2931. – DOI: 10.2514/6.2015-0337.
- Girard, A., Kabamba P. Proportional Navigation: Optimal Homing and Optimal Evasion // SIAM Review. – 2015. – Vol. 57 – P. 611–624. – DOI: 10.1137/130947301.
- Palumbo, N., Blauwkamp, R., Lloyd, J. Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // Johns Hopkins APL Technical Digest. – 2010. – Vol. 29, no. 1. – P. 42–59.
- Хайрер Э., Нёрсетт С.П., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1989. – 512 С. [Hairer, E., Norsett, S.P., Wanner, G. Solving Ordinary Differential Equations. – Berlin: Springer-Verlag, 1987. – 480 p.]
- Самохин А.С., Самохина М.А. Решение задачи Коши многомерным методом Рунге-Кутты, основанным на расчётных формулах Дормана-Принса 8(7), с автоматическим выбором шага. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020611811 : заявл. 30.01.2020 : зарег. 11.02.2020. [Samokhin, A.S., Samokhina, M.A. Reshenie zadachi Koshi mnogomernym metodom Runge-Kutty, osnovannym na raschetnykh formulakh Dormana-Prinsa 8(7), s avtomaticheskim vyborom shaga. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM no. 2020611811 : appl. 30.01.2020 : reg. 11.02.2020. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии
Е. Я. Рубиновичем.

Поступила в редакцию 24.10.2023,
после доработки 04.12.2023.
Принята к публикации 04.12.2023.

Галяев Андрей Алексеевич – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук,
✉ galaev@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6494-6880>

Самохин Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук,
✉ samokhin@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0821-050X>

Самохина Марина Александровна – науч. сотрудник,
✉ ph@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7043-706X>

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

© 2024 г. Галяев А. А., Самохин А. С., Самохина М. А.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

MODELING OF THE TARGET'S INTERCEPTION DELAY IN AN ADT GAME WITH ONE OR TWO DEFENDERS

A. A. Galyaev*, A. S. Samokhin**, and M. A. Samokhina***

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ galaev@ipu.ru, **✉ samokhin@ipu.ru, ***✉ ph@ipu.ru

Abstract. This paper considers the Attacker–Defender–Target (ADT) problem with one or two defenders in a 2D statement. By assumption, the target and defenders move in a straight line with a constant velocity whereas the attacker moves along a catch-up trajectory with an unbounded radius of curvature. Compared to the target's velocity, the defenders move slower whereas the attacker faster. The essence of using defenders is that the attacker first intercepts them and only then switches to pursuing the primary target. As a result, the time of intercepting the primary target increases, and the target may become unattainable for the attacker due to a limited fuel capacity. The angles and times of launching the defenders are optimized, including the case where both defenders are launched on the same side of the target. Different models of the homing system of an autonomous attacking vehicle are studied: moving to the center of mass of all pursued objects and moving to the nearest target by distance or by angular range. Numerical simulations are carried out, showing the importance of choosing the angle of launch of the defenders and the reasonability of using the second defender. Also, scenarios are obtained in which using defenders makes the primary target unattainable for the attacker.

Keywords: pursuit, homing system, defenders, autonomous vehicle, optimization, numerical simulation, interception, ADT.

Acknowledgments. This work was supported in part by the Russian Science Foundation (project no. 23-19-00134).