

УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННО ОРГАНИЗОВАННОЙ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ¹

Т. Г. Абрамянц, Е. П. Маслов, Е. Я. Рубинович

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

Рассмотрены задачи конфликтного управления подвижными объектами в условиях радиоэлектронного противодействия. Поведение противников моделируется дифференциальными играми с групповой целью и дифференциальными играми в смешанных стратегиях.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления в условиях искусственно организованной неполноты информации являются математическими моделями конфликтного управления в условиях радиоэлектронного противодействия (РЭП).

Чрезвычайная актуальность задач РЭП привела к тому, что к их решению были привлечены специалисты различных научно-технических дисциплин, в том числе, и теории управления.

Существуют различные способы воздействия средств РЭП на информационные и управляющие системы противника [1]. Основные из них заключаются в использовании имитирующих и подавляющих воздействий. Имитирующее воздействие сводится к созданию системы подвижных или неподвижных объектов материальной и(или) волновой природы, воспроизводящих с той или иной степенью подобия основные свойства защищаемого объекта. Радиоэлектронное подавление осуществляется путем создания помех в информационных каналах противника.

По инициативе А. М. Петровского, в Институте проблем управления возникло и развивается направление исследований, связанных с оптимизацией законов управления подвижными объектами в условиях РЭП.

Для оптимизации законов управления в условиях имитирующего воздействия был разработан новый раздел теории дифференциальных игр преследования-ук-

лонения — дифференциальные игры с групповой целью. Для оптимизации законов управления в условиях подавляющего воздействия был привлечен математический аппарат дифференциальных игр в смешанных стратегиях.

Настоящая работа содержит обзор основных результатов, полученных в ходе исследований.

1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИГРЫ С ГРУППОВОЙ ЦЕЛЬЮ

Дифференциальные игры с групповой целью являются математическими моделями задач преследования—уклонения, в которых уклоняющаяся истинная цель использует в ходе преследования ложные цели. Существенный момент в таких играх состоит в том, что число преследователей меньше числа целей. Наличие ложных целей приводит к информационной дискриминированности преследующей стороны, поскольку ей с достоверностью не известно, какая же из целей истинная. В связи с этим преследующая сторона должна затратить определенные ресурсы для обнаружения, классификации и последующего догона истинной цели или отказаться от попыток классификации целей и сблизиться (в некоторой метрике) с коалицией уклоняющихся в целом.

В задачах преследования-уклонения с групповой целью имеют смысл естественные для игр преследования—уклонения критерии типа “промах” или “время преследования”, которые порождают, соответственно, два класса задач:

— дифференциальные игры совместного преследования [2—6];

— дифференциальные игры поочередного преследования [2, 3, 6—10].

¹ Работа доложена на Научных чтениях памяти профессора А. М. Петровского, Москва, Ин-т проблем управления, 17 марта 2005 г.

1.1. Дифференциальные игры совместного преследования

Множество дифференциальных игр совместного преследования можно условно разбить на два подкласса:

- однокритериальные игры [2—6, 11],
- двухкритериальные игры [6, 12, 13].

Однокритериальные игры. Плата в однокритериальных играх совместного преследования формируется как взвешенная сумма терминальных (конечных) расстояний от преследователя до i -й цели:

$$G = \sum_{i=1}^N p_i |z_i(T)|; \quad \sum_{i=1}^N p_i = 1. \quad (1)$$

Здесь и далее T — момент окончания игры, $z_i(T)$, $i = 1, \dots, N$ — вектор, направленный от преследователя к i -й цели. Весовые коэффициенты $p_i \geq 0$ имеют смысл вероятности того, что i -я цель — истинная. Физический смысл критерия — математическое ожидание расстояния от преследователя до истинной цели в момент окончания игры. Плату G преследователь минимизирует, коалиция целей — согласованно максимизирует.

Идея организации процесса совместного преследования состоит в том, что в ходе его происходит сближение преследователя с группой целей в целом — а значит, происходит сближение и с истинной целью.

Введение в плату G вероятностей $p_i \geq 0$ позволяет учитывать информационные возможности преследователя по части классификации целей. Эти вероятности могут оставаться неизменными или меняться в ходе преследования, например, могут зависеть от текущих расстояний до целей [2].

Основная особенность однокритериальных игр совместного преследования заключается в том, что моментом окончания игры (прекращением преследования) распоряжается преследователь.

В зависимости от характера имеющейся информации управление преследователя может быть программным (зависящим лишь от начальных позиций противников) или позиционным (с обратной связью по текущим положениям противников). В первом случае преследователь выбирает закон управления движением и длительность игры в начальный момент времени, во втором — имея информацию о текущих позициях сторон, останавливает игру по достижении определенного взаимного положения игроков (т. е. при выходе состояния игры на некоторую терминальную поверхность).

В классе однокритериальных игр совместного преследования больше всего результатов получено для случая противодействия одного преследователя и группы из двух целей. Здесь решены задачи с фиксированной и нефиксированной заранее (выбираемой преследователем) длительностью игры [2—4]. Найдены решения при программных и позиционных законах управления траекторией преследования, при безынерционных (“простых” — по терминологии работы [14]) движениях игроков и при ограничениях на кривизну их траекторий.

Приведем в качестве примера решение плоскостной дифференциальной игры совместного преследования в позиционных стратегиях при “простых” движениях иг-

роков и постоянных вероятностях p_i . Динамика игры описывается соотношениями

$$\dot{z}_i = v_i - u, \quad z_i(0) = z_i^0, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где v_i , u — двумерные векторы управлений (скоростей) игроков: i -й цели E_i и преследователя P , соответственно, стесненные ограничениями

$$|u| \leq 1; \quad |v_i| \leq \beta_i \leq 1, \quad (3)$$

$z_i^t \triangleq z_i(t)$ — двумерный вектор, направленный от преследователя P к цели E_i в текущий момент t . Здесь и далее верхний индекс указывает момент времени.

Решение задачи имеет следующий вид.

Оптимальными стратегиями игроков являются движения по прямым с максимальными скоростями.

При

$$\beta = p_1 \beta_1 + p_2 \beta_2 \geq |p_2 - p_1|, \quad (4)$$

в зависимости от начального расположения целей, игра заканчивается точечной встречей с одной из целей или в момент выхода фазового состояния игры на терминальную поверхность

$$\frac{\langle z_1^T, z_2^T \rangle}{|z_1^T| \cdot |z_2^T|} = \frac{\beta^2 - p_1^2 - p_2^2}{2p_1 p_2} \quad (5)$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ — символ скалярного произведения векторов, $z_i^T = z_i(T)$.

Решение задачи (1)—(5) иллюстрируется рис. 1. В неподвижной системе координат, связанной с начальным положением преследователя P^0 (здесь и далее верхними индексами отмечены положения игроков в соответствующие моменты времени), изображено разбиение области начальных положений дальней цели E_2^0 , т. е. внешности круга радиуса $\rho_1 = |z_1^0|$, на зоны A , B , D_1 и D_2 назначения оптимальных управлений игроков. Границами зон служат лучи L_1 , L_2 и L_3 , проведенные из точек

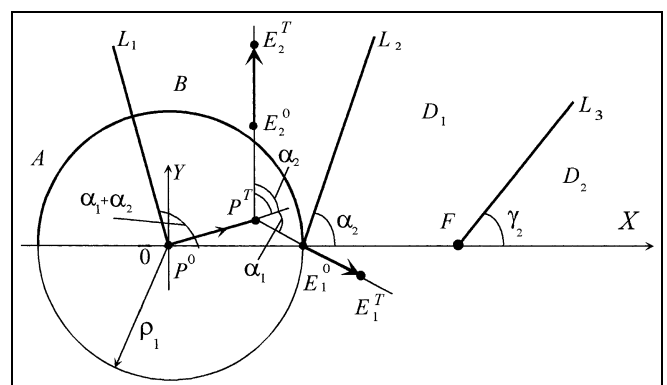


Рис. 1. Разбиение области начальных позиций целей на зоны оптимальных маневров



0 , $E_1^0, F = (\rho_1 + h, 0)$ под углами $\alpha_1 + \alpha_2$, α_2 и γ_2 , которые вычисляются в явном виде из соотношений

$$\cos \alpha_1 = (\beta^2 + p_1 - p_2)/(2p_1\beta),$$

$$\cos \alpha_2 = (\beta^2 + p_2 - p_1)/(2p_2\beta),$$

$$\sin \gamma_2 = (p_1 - \beta_1\beta)\sin(\alpha_1 + \alpha_2)/(\beta_1(1 + \beta_1^2 - 2\beta_1\cos\alpha_1)^{1/2}),$$

где $h = \rho_1\beta_1\beta/(p_1 - \beta_1\beta)$. При $E_2^0 \in A$ длительность игры равна нулю. При $E_2^0 \in B$; $E_2^0 \in D_1$ игра заканчивается реализацией терминального условия (5). При $E_2^0 \in D_2$ преследователь осуществляет встречу с ближней целью.

В случае нарушения неравенства (4) определяющими являются не геометрические, а вероятностные характеристики целей. При любых начальных положениях целей преследователь осуществляет точечную встречу с той целью, вероятность p_i классификации которой как истинной выше.

Двухкритериальные игры совместного преследования являются математическими моделями задач уклонения подвижных объектов от обнаружения с применением средств РЭП. Необходимость в средствах РЭП возникает в тех случаях, когда начальное положение уклоняющегося объекта принадлежит *области захвата* преследователя. Такое название получила подвижная область в пространстве поиска, прилегающая к области обнаружения преследователя и обладающая тем свойством, что из точек этой области уклонение невозможно [3, 13]. Структура зоны захвата зависит от формы зоны обнаружения, динамических характеристик противодействующих объектов, вида траекторий поиска.

Далее приводятся постановка и решение двухкритериальной плоскостной дифференциальной игры [13].

Три объекта — преследователь P , истинная цель E_1 и ложная цель E_2 , обладая ограниченными скоростями, перемещаются по плоскости, имея возможность в каждый момент времени произвольно изменять направления своих движений.

Преследователь снабжен круговой зоной обнаружения радиуса R , центр которой совпадает с его текущим положением. Цель обнаруживается при попадании ее на границу зоны обнаружения.

До момента обнаружения какой-либо из целей преследователь движется по прямой с максимальной скоростью. После обнаружения цели — по траектории, соответствующей минимуму времени до классификации обнаруженной цели. Цель классифицируется преследователем с расстояния $r \leq R$.

Вводится неподвижная прямоугольная система координат XOY , начало которой совмещено с исходным положением преследователя P^0 , а положительное направление оси абсцисс совпадает с вектором скорости преследователя при $t = 0$ (рис. 2).

Прямолинейной поисковой траектории преследователя соответствует зона захвата, имеющая вид симметричного криволинейного треугольника $ABCD$, ограниченного дугой окружности и двумя касательными к окружности, пересекающимися в точке с координатами $(R/\beta_1, 0)$, где β_1 — отношение скоростей истинной цели и преследователя.

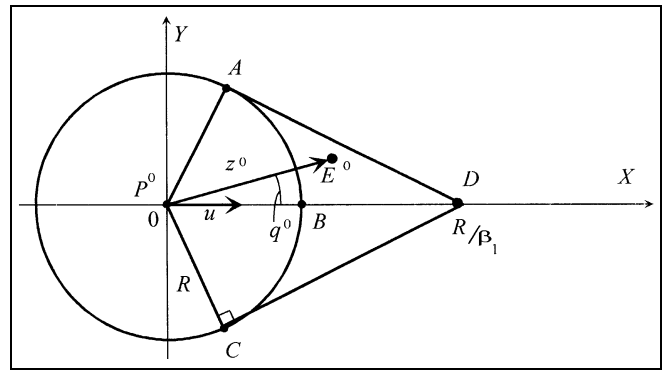


Рис. 2. Структура зоны захвата одиночной цели

В начальный момент времени обе цели находятся в одной точке $E_1^0 = E_2^0 = E^0$ вне зоны обнаружения, но внутри области захвата (см. рис. 2).

Процесс противодействия преследователя и системы целей состоит из этапа поиска цели и этапа отвлечения (преследователя).

Динамика игры описывается соотношениями (2) и (3).

Коалиция целей согласованно максимизирует минимальное по времени расстояние между преследователем и истинной целью:

$$G_1 = \min_t |z_1(t)| \rightarrow \max_{v_1, v_2}$$

Преследователь минимизирует время до момента классификации обнаруженной первой (ложной) цели

$$G_2 = T - s \rightarrow \min_u$$

где моменты s и T определяются соотношениями $|z_2(s)| = R$, $|z_2(T)| = r$.

Решение задачи имеет следующий вид.

Оптимальными стратегиями игроков являются движения с максимальными скоростями. Траектории преследователя и ложной цели состоят из двух отрезков прямых. Излом траекторий происходит в момент обнаружения преследователем ложной цели. Траектория истинной цели — прямолинейная. Минимальное расстояние между преследователем и истинной целью достигается на этапе отвлечения.

Система целей имеет два равноправных маневра, соответствующих выходу истинной цели из зоны захвата через одну или другую прямолинейную границу зоны. По оптимальной траектории истинная цель в течение всей игры движется перпендикулярно границе зоны захвата, построенной относительно траектории преследователя на этапе отвлечения.

На рис. 3 изображены кривые 1—3, соответствующие границам области начальных позиций внутри зоны захвата, из которой возможно уклонение истинной цели при наличии ложной цели. Кривые построены для $\beta_1 = \beta_2 = 0,4$ и $\sigma = r/R = 0$ (кривая 1), $\sigma = 0,2$ (кривая 2), $\sigma = 0,4$ (кривая 3). Уклонение возможно из точек, лежащих правее соответствующих кривых.

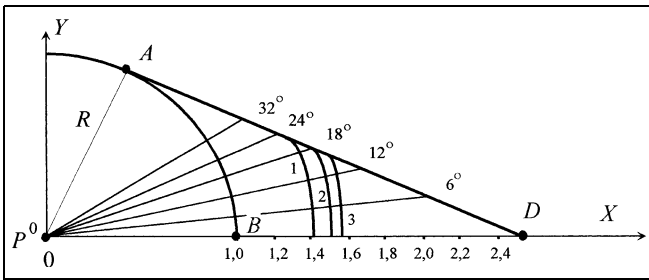


Рис. 3. Зоны захвата цели в условиях радиоэлектронного противодействия

Сокращение размера зоны захвата происходит вследствие того, что преследователь “отвлекается” на классификацию обнаруженной (ложной) цели.

Кривые на рис. 3 позволяют оценить степень сокращения области начальных позиций цели, из которых невозможно уклонение от обнаружения.

1.2. Дифференциальные игры поочередного преследования

В этих играх платой служит полное время поимки преследователем всех целей.

Специфика игр этого класса состоит в том, что в управление преследователя входит выбор очередности встреч с целями. Порядок встреч можно выбирать по-разному:

— в момент начала игры, т. е. программно [2, 7, 10, 11, 15–17];

— в процессе преследования как функцию текущих позиций игроков, т. е. позиционно [3, 9, 11].

В первом случае порядок встреч фиксируется в момент начала преследования и не меняется до конца игры. Во втором случае возможна смена порядка очередности встреч в ходе игры.

Далее приводятся постановка и решение плоскостных игр с программным и поочередным выбором порядка встреч при одинаковых максимальных скоростях целей: $\beta_1 = \beta_2 = \beta$.

Рассмотрим вначале игру поочередного преследования с программным выбором.

Три игрока — преследователь P и цели E_A, E_B , обладающая ограниченными скоростями, перемещаются по плоскости. Игроки обладают “простыми” движениями. Уравнения движения:

$$\dot{z}_i = v_i - u, \quad z_i(0) = z_i^0, \quad i = A, B, \quad (6)$$

$$|u| \leq 1, \quad |v_i| \leq \beta < 1. \quad (7)$$

Условия первой (в момент T_1) и второй (в момент T_2) встреч имеют вид:

$$z_j(T_1) = 0, \quad z_k(T_2) = 0, \quad (8)$$

где, в зависимости от очередности встреч, $j = A, k = B$ или $j = B, k = A$.

Плата выражается функционалом

$$G = T_1 + T_{12} = T_2 \rightarrow \min \max_{u, k} v_A, v_B \quad (9)$$

где T_{12} — интервал времени между встречами.

Пусть в момент $t = 0$ преследователь P принимает решение о том, что вначале происходит встреча с игроком E_A , а затем с игроком E_B .

Введем неподвижную систему координат XOY , начало которой совпадает с исходным положением преследователя P^0 , а ось абсцисс проходит через начальное положение E_A^0 . Пусть вторая цель E_B^0 в начальный момент находится в верхней полуплоскости (рис. 4).

Решение игры (6)–(9) имеет следующий вид.

Оптимальными стратегиями игроков являются движения по прямым с максимальными скоростями. Геометрическим местом точек встречи преследователя и цели E_A является окружность Аполлония. Уравнение этой окружности

$$\left(x - \frac{|z_A^0|}{1 - \beta^2}\right)^2 + y^2 = |z_A^0|^2 \left(\frac{\beta}{1 - \beta^2}\right)^2.$$

Преследователь встречается с целью E_A в точке

$P^{T_1} = E_A^{T_1}$. Цель E_B движется по прямой, соединяющей

точки P^{T_1} и E_B^0 . Справедливы равенства $\nu = \mu = \psi_A$, где ψ_A — угол между траекторией цели E_A и осью абсцисс (см. рис. 4), ν, μ — углы между радиусом окружности

Аполлония, проведенным в точку P^{T_1} , и траекториями преследователя до и после встречи с целью E_A (см. рис. 4).

Цена игры

$$G_{AB}^* = \frac{|z_B^0| \sin(\delta^0 + \psi_A + \varphi)}{(1 - \beta) \sin \psi_A},$$

где $\delta_0 = (\angle z_A^0, \angle z_B^0)$, φ — угол между траекторией преследователя и осью абсцисс, углы ν и μ удовлетворяют условию оптимального “отражения” траектории преследователя от окружности Аполлония, звездочкой снабжены оптимальные величины.

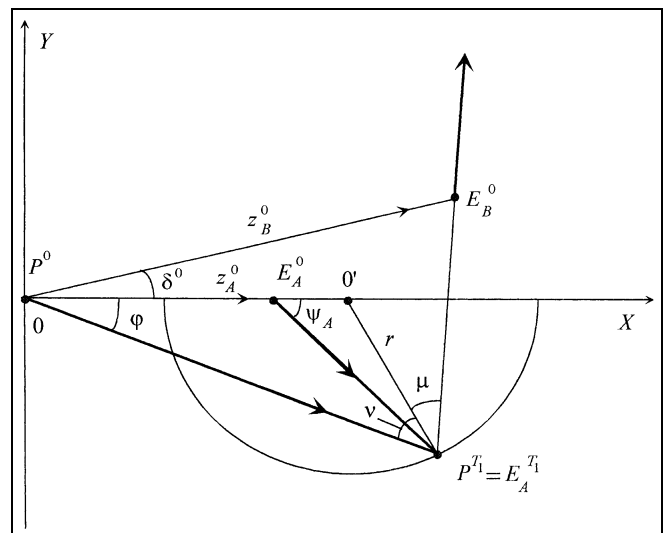


Рис. 4. Структура оптимальных траекторий при программном выборе очередности встреч с целями



Аналогично решается задача с платой G_{BA} (вначале преследователь встречается с целью E_B). Оптимальная последовательность встреч определяется в момент $t = 0$ из условия $\min(G_{AB}^*, G_{BA}^*)$, что в данном случае эквивалентно условию $\min(|z_A^0|, |z_B^0|)$: преследователь встречается вначале с тем игроком, до которого начальное расстояние меньше.

Обозначим этого игрока индексом 1, дальнего — индексом 2.

Перейдем к игре с позиционным выбором очередности.

В игре с программно выбранной очередностью встреч знак разности $|z_2(t)| - |z_1(t)|$ в процессе движения игроков может, вообще говоря, изменяться. Позиционное управление по индексу k позволяет учесть тот факт, что при $|z_2(t)| = |z_1(t)|$ в игре, начинающейся в момент t , цена как функция текущего состояния $\{z_2(t), z_1(t)\}$ не зависит от очередности встреч. В смысле платы игроки E_1 и E_2 в этот момент идентичны для преследователя, и он может переиндексировать их, т. е. изменить порядок встреч.

Смена очередности не произойдет, если на оптимальных управлениях u^*, v_1^* и v_2^* , соответствующих программному выбору очередности встреч, в течение всего интервала $[0, T_1]$ реализуется неравенство $|z_2(t)| \geq |z_1(t)| \geq 0$.

Обозначим символом $\Gamma^0 = \{x_2^0, y_2^0\}$ множество начальных позиций дальней цели E_2^0 , для которых на оптимальных управлениях, соответствующих программному выбору очередности, выполняется неравенство

$$|z_2(t)| - |z_1(t)| \geq 0, \quad t \in [0, T_1], \quad (10)$$

и, кроме того, существует момент

$$\theta = \inf\{t: |z_2(t)| - |z_1(t)| = 0\}, \quad t \in [0, T_1].$$

В статье [9] показано, что множество Γ^0 имеет вид отрезка прямой, пересекающей ось абсцисс и касающейся окружности радиуса $|z_1^0|$, — см. отрезок $M^0 N^0$ на рис. 5.

Угловая координата точки касания $\delta^* = \pi/2 - \varphi^* - 2\psi_1^*$, где углы φ^* и ψ_1^* однозначно определяются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \sin\varphi - \beta\sin\psi_1 &= 0, \\ \cos\varphi - \beta\cos\psi_1 &= \sin 2\psi_1, \quad \varphi, \psi_1 \geq 0. \end{aligned}$$

Отрезок $M^0 N^0$ разбивает все множество начальных позиций дальней цели E_2^0 (внешность круга радиуса $|z_1^0|$ в верхней полуплоскости) на две зоны: C и D .

При $E_2^0 \in D$ (внешность криволинейного треугольника $E_1^0 M^0 N^0$) очередность встреч фиксируется в момент $t = 0$ и в процессе всего преследования выполняется строгое неравенство (10).

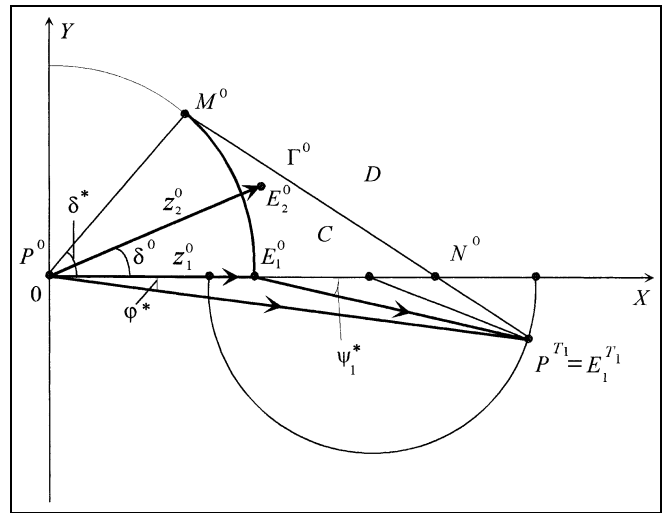


Рис. 5. Структура области начальных позиций целей при наличии этапа совместного преследования

При $E_2^0 \in C$ (внутренность треугольника) в игре найдется момент θ такой, что $E_2^0 \in M^0 N^0 \triangleq \Gamma^0$ и, кроме того,

$$|z_1^0| = |z_2^0|, \quad (z_1^0, z_2^0) = \delta^*,$$

где $z_i^0 \triangleq z_i(\theta), i = 1, 2$.

Момент θ разбивает игру на два этапа $[0, \theta]$ и $[\theta, T]$.

Цена игры поочередного преследования на интервале $[\theta, T]$ $G_\theta = \sigma|z_1^0|$, где $\sigma = (1 - \beta)^{-1} \text{ctg}\psi^*$.

Полное время поочередного преследования в игре с позиционным выбором очередности $G = \theta + \sigma|z_1^0|$.

Игру на интервале $[0, \theta]$ можно рассматривать как совместное преследование игроком P группы целей E_1 и E_2 . Этапу совместного преследования можно дать следующую интерпретацию: в течение всего интервала $[0, \theta]$ преследователь P держит игроков E_1 и E_2 в условиях неопределенности об очередности встреч; окончательное решение о порядке встреч с целями принимается лишь в момент θ . Созданием этой неопределенности преследователю удастся уменьшить цену игры.

Рис. 6 иллюстрирует структуру оптимальных траекторий игроков в игре поочередного преследования с позиционным выбором очередности для случая, когда в начальный момент обе цели находятся в одной точке $E_{1,2}^0$. На интервале времени $[0, \theta]$ преследователь движется по прямой $P^0 E_{1,2}^0$. Цели расходятся симметрично относительно этой прямой, $\alpha_1 = -\alpha_2$. В момент θ , находясь в позиции P^0 , преследователь выбирает очередность встреч с целями. Рис. 6 соответствует случаю, когда вначале осуществляется точечная встреча с целью E_1 .

Заштрихованный треугольник $\Delta M^0 E_1^0 N^0$ есть зона C , построенная в момент θ .

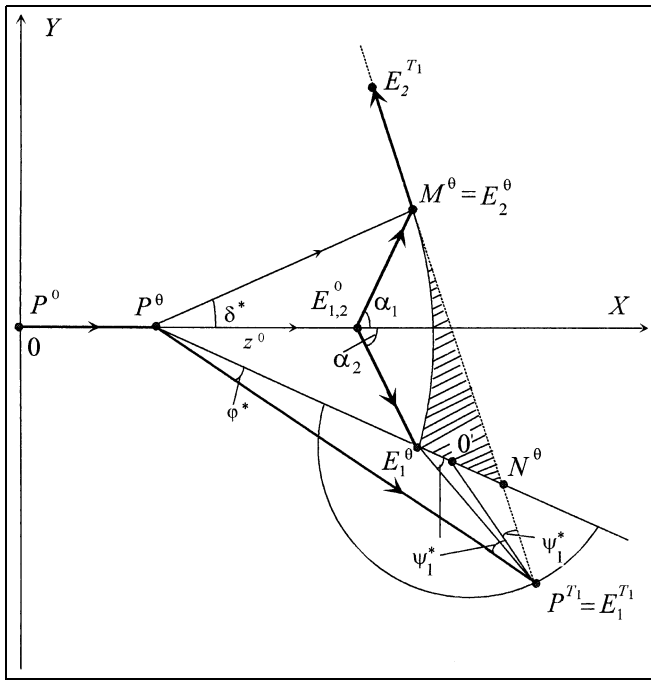


Рис. 6. Структура оптимальных траекторий при позиционном выборе очередности встреч с целями

Расчеты показывают, что при $0,4 \leq \beta \leq 0,8$ позиционный выбор очередности позволяет на 10–20% сократить длину траектории преследования.

2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИГРЫ В СМЕШАННЫХ СТРАТЕГИЯХ

Дифференциальные игры в смешанных стратегиях являются математическими моделями задач противодействия подвижных объектов, в которых уклоняющаяся сторона осуществляет подавляющее воздействие на информационные системы противника. Однако одновременно подавляются и информационные системы уклоняющегося. В отсутствие текущей информации о фазовых координатах противника игроки используют программные управления до момента восстановления контакта. В этом состоит основная содержательная особенность задач управления в условиях подавляющего воздействия средств РЭП.

Для синтеза оптимальных управлений подвижными объектами в условиях подавляющего воздействия был применен аппарат теории программных игр в смешанных стратегиях [18, 19].

Приведем в качестве примера постановку и решение плоскостной дифференциальной игры для случая, когда истинная цель E_1 использует для подавления информационной системы преследователя P неподвижную ложную цель E_2 .

Вводится неподвижная система координат XOY , начало которой совпадает с начальным положением преследователя P^0 , а ось абсцисс проходит через общее начальное положение целей $E_{1,2}^0$. Преследователь снаб-

жен зоной обнаружения $\Omega[w_p(t)]$, имеющей вид круга (кругового сектора), центр которого совпадает с текущим положением преследователя $w_p(t)$ в системе координат XOY . Начальным считается момент постановки ложной цели. Предполагается, что после постановки ложной цели преследователь P и истинная цель E_1 движутся по прямолинейным траекториям с постоянными скоростями. Направления их движений задаются углами φ и ψ , которые составляют прямолинейные траектории преследователя P и истинной цели E_1 с осью абсцисс, соответственно.

Оптимальные стратегии игроков ищутся в классе смешанных. В качестве элементов чистых стратегий выбираются их программные управления (траектории). Смешанные стратегии определяются как вероятностные распределения на множествах чистых стратегий.

Критерий образуется следующим образом. Определяется множество

$$T(\tilde{w}_1, \tilde{w}_p) = \{t: w_1(t) \in \Omega[w_p(t)]\}$$

моментов времени, в которые текущее положение истинной цели E_1 оказывается внутри области обнаружения преследователя. Здесь $\Omega[w_p(t)]$ — открытая область, совпадающая с зоной обнаружения преследователя P в момент t ; $w_1(t)$ и $w_p(t)$ — двумерные векторы положений истинной цели E_1 и преследователя P , соответственно, в момент t ; \tilde{w}_1, \tilde{w}_p — соответствующие траектории объектов.

Критерий — вероятность уклонения цели E_1 от обнаружения преследователем P — есть математическое ожидание платежной функции

$$G = Pr\{T(\tilde{w}_2, \tilde{w}_p) = \emptyset\} = M_\chi\{T(\tilde{w}_2, \tilde{w}_p)\} \rightarrow \rightarrow \min_{P_\varphi} \max_{E_\psi} \quad (11)$$

где P_φ и E_ψ — вероятностные распределения на множествах чистых стратегий (направлений движения) игроков P и E_1 , соответственно; M — символ математического ожидания; платежная функция имеет вид:

$$\chi\{T(\tilde{w}_2, \tilde{w}_p)\} = \begin{cases} 0, & T(\tilde{w}_1, \tilde{w}_p) \neq \emptyset \\ 1, & T(\tilde{w}_1, \tilde{w}_p) = \emptyset. \end{cases}$$

Этот критерий минимизируется по управлениям преследователя φ и максимизируется по управлениям истинной цели ψ , что и отражается в формуле (11).

Решение задачи ищется в смешанных стратегиях. При нахождении оптимальных стратегий используется прием построения “редчайшей” сети [18, 19].

В решаемой задаче этот прием сводится к построению траекторий участников группы, состоящей из минимального числа N действующих совместно преследователей, обладающих тем свойством, что при любом законе уклонения истинная цель E_1 будет обнаружена хотя бы одним преследователем.

В результате решения задачи определяются:

— множество оптимальных поисковых траекторий преследователя P ; это множество состоит из траекторий участников указанной группы поисковых средств;

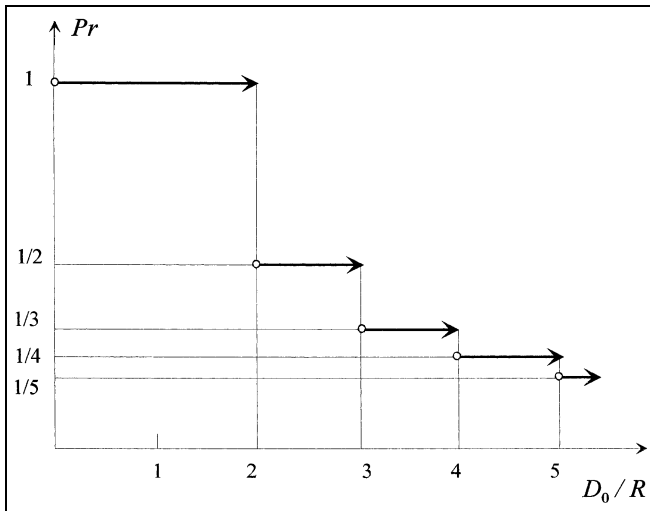


Рис. 7. График цены игры в смешанных стратегиях

— множество оптимальных траекторий уклонения истинной цели E_1 ; траектории из этого множества обладают тем свойством, что на каждой траектории уклоняющаяся цель может быть обнаружена не более, чем одним преследователем из группы;

— цена игры — вероятность G^* уклонения цели E_1 от обнаружения преследователем.

В работе [18] показано, что при прямолинейных траекториях преследования—уклонения и круговой (секторной) области обнаружения преследователя множество оптимальных чистых стратегий игроков состоит ровно из N элементов, а оптимальными смешанными стратегиями являются равномерные дискретные распределения на множествах чистых стратегий.

На рис. 7 приведен график зависимости $Pr = 1 - G^*$ — вероятности R -встречи игроков (обнаружения истинной цели преследователем) от отношения R/D_0 , где D_0 — начальное расстояние между объектами, R — радиус круговой зоны обнаружения преследователя. График построен для случая, когда скорость цели в два раза меньше скорости преследователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделен новый класс задач конфликтного управления подвижными объектами, названный авторами "управление в условиях искусственно организованной неполноты информации". Содержательно сформулированные задачи описаны математическими моделями управления подвижными объектами в условиях имитирующего и подавляющего воздействий средств радиоэлектронного подавления информационных систем противника.

Для оптимизации законов управления в условиях имитирующего воздействия был разработан новый раздел теории дифференциальных игр преследования—уклонения — дифференциальные игры с групповой целью. Для оптимизации законов управления в условиях подавляющего воздействия привлечен математический аппарат дифференциальных игр в смешанных стратегиях.

Рассмотрены, в основном, результаты, полученные в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

Исследования в описанных в статье направлениях ведутся и в других исследовательских центрах: в России — университетах Санкт-Петербурга и Владивостока, на Украине — в Институте кибернетики НАНУ, а также — в Израиле, США, Англии, Германии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоэлектронная борьба в ВМФ / Под ред. Ю. В. Ефимова. — М.: Оружие и технологии, 2003. — 244 с.
2. Олышанский В. К., Рубинович Е. Я. Простейшие дифференциальные игры преследования системы из двух объектов // Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 1. — С. 24—34.
3. Маслов Е. П., Рубинович Е. Я. Дифференциальные игры преследования-уклонения с групповой целью // Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. — 1991. — Т. 32. С. 32—58.
4. Абрамянц Т. Г., Маслов Е. П. Дифференциальная игра преследования групповой цели // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2004. — № 5. — С. 16—22.
5. Шевченко И. И. Стратегии сближения с коалициями в целом. — Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2004. — 132 с.
6. Шевченко И. И. О сближении с коалицией // Автоматика и телемеханика. — 1986. — № 1. — С. 47—55.
7. Шевченко И. И. О поочередном преследовании // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 11. — С. 54—59.
8. Шевченко И. И. Поочередное преследование трех убегающих // Автоматика и телемеханика. — 1983. — № 7. — С. 70—75.
9. Абрамянц Т. Г., Маслов Е. П., Рубинович Е. Я. Простейшая дифференциальная игра поочередного преследования // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 8. — С. 5—15.
10. Иванов М. Н., Маслов Е. П. О сравнении двух методов преследования в задаче о поочередной встрече // Автоматика и телемеханика. — 1983. — № 8. — С. 38—43.
11. Шевченко И. И. Геометрия альтернативного преследования. — Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2004. — 240 с.
12. Иванов М. Н., Маслов Е. П. Об одной задаче уклонения // Автоматика и телемеханика. — 1984. — № 8. — С. 56—62.
13. Об одной задаче уклонения от обнаружения / Т. Г. Абрамянц, М. Н. Иванов, Е. П. Маслов, В. П. Яхно // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 10. — С. 3—12.
14. Айзекс Р. Дифференциальные игры. — М.: Мир, 1967. — 415 с.
15. Петросян Л. А., Ширяев В. Д. Групповое преследование одним преследователем нескольких преследователей // Вестник ЛГУ. — 1980. — № 13. — С. 50—57.
16. Чикрий А. А., Калашиникова С. Ф. Преследование управляемым объектом группы убегающих // Кибернетика. — 1987. — № 4. — С. 1—8.
17. Shevchenko I. I. Successive Pursuit with a Bounded Detection Domain // Journal of Opt. Theory and Appl. — 1997. — Vol. 95, N 1.
18. Ермолов А. Н., Кряковский Б. С., Маслов Е. П. Об одной дифференциальной игре в смешанных стратегиях // Автоматика и телемеханика. — 1986. — № 10. — С. 32—45.
19. Железнов В. С., Кряковский Б. С., Маслов Е. П. Простейшая дифференциальная игра с выбором момента времени в смешанных стратегиях // Автоматика и телемеханика. — 1987. — № 8. — С. 46—55.

☎ (095) 334-91-81

E-mail: @ipu.ru

