

УДК 531.3:681.5.01

ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТА ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ПРИ УКЛОНЕНИИ ОТ РАЗНОРОДНЫХ ПОИСКОВЫХ СИСТЕМ

А.А. Галяев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: galaev@ipu.ru

Е.П. Маслов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: E-masl@yandex.ru

П.В. Лысенко

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: pashlys@ipu.ru

В.П. Яхно

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: vic-iakno@ipu.ru

Т.Г. Абрамянц

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: abramnc@ipu.ru

*Светлой памяти
нашего друга и коллеги
посвящается*

Ключевые слова: Планирование маршрута; подвижный объект; система разнородных наблюдателей; уклонение от обнаружения; оптимизация задачи управления.

Аннотация: Аннотация. Представлены формализация и результаты решения ряда задач об уклонении на плоскости подвижного объекта от обнаружения системой однородных и /или разнородных наблюдателей, осуществляющих обнаружение объекта по излучаемым этим объектом сигналам первичного (пассивный режим) и переизлученного вторичного (активный режим) полей. Приведены результаты моделирования.

1. Введение

В 2014 году авторы представляли на Всероссийском совещании по проблемам управления свои результаты по оптимизации маршрутов подвижных объектов в конфликтной среде. В настоящем докладе представлено развитие методов планирования маршрутов и предложены новые постановки задач оптимизации. Рассматриваемый класс задач об управлении получил в англоязычной литературе название «Path Planning in the Threat Environment» [1-7]; который в русскоязычной литературе называется как задачи управления подвижными объектами (ПО) в конфликтной среде [8]. Под конфликтной средой понимается совокупность объектов (они называются конфликтующими), сближение с которыми для управляемого ПО нежелательно в ходе выполнения им основной задачи. Целью управления ПО при движении его в конфликтной среде является минимизация негативного воздействия конфликтующих объектов на управляемый объект путем выбора маршрута и параметров движения последнего. К числу негативных воздействий принято относить обнаружение объекта. Постановки задач планирования маршрута отличаются предположениями о характеристиках информационных полей, в которых происходит обнаружение, классами допустимых законов управления, видом критериев качества, количеством обнаружителей, объемом и характером информации, доступной конфликтующим сторонам (см. [1-7, 9, 10] и библиографию к указанным статьям).

Совокупность конфликтующих объектов формирует карту угроз для ПО, которая должна учитываться при построении закона уклонения от обнаружения. Для описания механизмов обнаружения в литературе наиболее часто используются два подхода.

Первый подход состоит в оценке интегрального уровня сигнала, излученного ПО и поступившего на вход относительно большой информационно-наблюдательной системы за все время наблюдения. В литературе такую систему принято называть сенсором.

Оценка интегрального уровня сигнала на входе сенсора определяется с учетом решения задачи об оптимизации закона управления ПО, перемещающимся в течение промежутка времени T по маршруту из начальной точки $A(x_A, y_A)$ в конечную точку $B(x_B, y_B)$ и уклоняющимся при этом от обнаружения сенсором (группой сенсоров), расположенных в районе. Интегральный уровень сигнала получил название энергетического риска.

Второй подход к описанию механизма обнаружения состоит в том, что наблюдатель отождествляется с точечным объектом, снабженным круговой зоной обнаружения фиксированного радиуса, центр которой совпадает с текущей позицией наблюдателя. В литературе такой наблюдатель принято называть информационным детектором (или просто детектором). В простейшем случае предполагается, что цели, попавшие внутрь круга, обнаруживаются мгновенно и достоверно; цели, не попавшие в круг, – не обнаруживаются. Детектор является устройством, производящим обнаружение вторичного поля ПО. Указанный подход описан, например, в [6, 7].

Помимо сенсоров и детекторов авторами рассматриваются маневренные средства. Основным критерием в задачах уклонения объекта от обнаружения является вероятность обнаружения, т.е. вероятность обнаружения хотя бы один раз и хотя бы одним наблюдателем за время движения объекта по маршруту. Оптимизация сводится к нахождению траектории и закона изменения скорости объекта, доставляющих минимум указанному критерию

$$P_{\text{обн}} = 1 - (1 - P_{\text{стац}})(1 - P_{\text{ман}}),$$

где $P_{\text{обн}}$, $P_{\text{стац}}$, $P_{\text{ман}}$ – вероятности обнаружения ПО всей системой средств, системой стационарных средств и маневренными средствами, соответственно.

2. Критерии оптимизации

Будем рассматривать частный случай (хотя и общий случай описывается подобным образом), когда все сенсоры имеют одинаковые характеристики, используются одинаковые алгоритмы обработки информации и осуществляется прием в одних и тех же помеховых условиях, оптимизация закона уклонения ПО от обнаружения системой из N сенсоров сводится к решению вариационной задачи о минимизации функционала (риска)

$$(1) \quad R = \int_0^T \sum_{i=1}^N \frac{(\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2})^m}{(\sqrt{(x(t) - a_i)^2 + (y(t) - b_i)^2})^k} dt \rightarrow \min_{(\dot{x}, \dot{y}, x, y)}$$

Вариационная задача (1), имеет следующую физическую интерпретацию. Подынтегральное выражение в (1) пропорционально мгновенному уровню интенсивности сигнала, излученного объектом, прошедшего через среду распространения и принятого системой сенсоров. Критерий (1) получил название энергетического риска. Таким образом, при малых отношениях сигнал/помеха минимизация вероятности обнаружения сводится к минимизации энергетического риска.

При построении математической модели обнаружения ПО маневренными силами и средствами считаются известными расположение и характеристики района, в котором происходит противодействие сторон, а также предположения о составе сил и средств обнаружения и тактике их применения. Основной характеристикой модели является интенсивность поиска $\gamma(t)$ – среднее число обнаружений объекта в единицу времени. В предположении о малости величины $\gamma(t)$ определяется вероятность обнаружения объекта маневренным средством хотя бы один раз за время поиска T (в литературе [11] эта величина называется просто вероятностью обнаружения)

$$(2) \quad P_{\text{обн}} = 1 - \exp\left(-\int_0^T \gamma(t) dt\right).$$

Стоящий в круглых скобках интеграл получил название потенциала поиска. Конкретное значение потенциала поиска определяется тактико-техническими характеристиками средств обнаружения.

В предположении о том, что все средства обнаружения действуют независимо, в силу (1) и (2), получаем следующее выражение для критерия оптимизации закона уклонения ПО от обнаружения всей системой наблюдателей:

$$R = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^N \frac{(\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2})^m}{(\sqrt{(x(t) - a_i)^2 + (y(t) - b_i)^2})^k} + \sum_{s=1}^S \chi_s \gamma_s(t) \right) dt,$$

где S – количество маневренных средств обнаружения, χ_s – характеристическая функция принимающая значение 1 в случае, когда маршрут ПО проходит через район, контролируемый соответствующим маневренным средством, и 0 – в противном случае.

3. Уклонение ПО от обнаружения системой наблюдателей (сенсор – маневренное средство)

В статье [12] Рассматривается задача построения траектории уклонения ПО на плоскости. Поисковая система состоит из сенсора, расположенного в начале декартовой системы координат, и маневренных поисковых средств. Заданы начальная $A(x_A, y_A)$ и конечная $B(x_B, y_B)$ точки маршрута. Вводится полярная система координат, полюс которой совпадает с положением сенсора, а полярная ось проходит через начальную точку маршрута. Полярные координаты произвольной точки плоскости

обозначаются символами (ρ, ψ) . Время движения по маршруту фиксировано и равно T . Область поиска маневренного средства задается связной областью Q .

Основной характеристикой модели маневренного средства является интенсивность поиска $\gamma(t)$ – среднее число обнаружений объекта в районе поиска в единицу времени. Критерий имеет следующий вид:

$$R = \int_0^T (p_1 I + p_2 \chi_Q \gamma(t)) dt,$$

где p_1, p_2 – весовые коэффициенты, χ_Q – индикатор множества Q . Вводится величина $p = p_2 \gamma(t) / p_1$. Предполагается, что интенсивность поиска постоянна. Тогда во введенной полярной системе координат задача об оптимизации закона уклонения от обнаружения системой сенсор – маневренное средство сводится к минимизации функционала

$$R = \int_0^T \left(\frac{\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\psi}^2}{\rho^2} + \chi_Q p \right) dt \rightarrow \min_{(\psi(\cdot), \rho(\cdot))},$$

при наличии граничных условий

$$\rho(0) = \rho_A, \psi(0) = 0, \rho(T) = \rho_B, \psi(T) = \psi_B,$$

где первое слагаемое, стоящее под интегралом, пропорционально интенсивности поиска сенсором, второе слагаемое – интенсивности поиска маневренным средством в заданном районе Q .

Решение краевой вариационной задачи, если зона действия маневренного поискового средства охватывает всю плоскость, не отличается от решения задачи при отсутствии такого средства, т.е. при $p = 0$. Оптимальной траекторией в этом случае является логарифмическая спираль, проходящая через начальную и конечную точку маршрута.

Предполагается, что оптимальная траектория частично проходит внутри области Q , а именно проходит через точки A, C, D, B , где точки C, D лежат на границе области Q . Также предполагается, что логарифмическая спираль, соединяющая точки C, D , полностью лежит внутри области Q . Тогда задача оптимизации траектории заключается в выборе этих точек и времени нахождения на каждом участке траектории.

Сектор – зона действия маневренного средства. Предполагается, что между начальной т. A и конечной т. B маршрута движения подвижного объекта находится область действия маневренного средства, заданная в виде

$$Q = \{(\psi, \rho) : \psi \in [\psi_C, \psi_D], \rho \in (0, +\infty)\}.$$

Границей множества Q являются лучи

$$Q_C = \partial Q = \{(\psi, \rho) : \psi = \psi_C, \rho \in (0, +\infty)\},$$

$$Q_D = \partial Q = \{(\psi, \rho) : \psi = \psi_D, \rho \in (0, +\infty)\}.$$

В задаче получено аналитическое решение. В качестве примера приводится решение при следующих начальных условиях: $\psi_A = 0, \psi_B = \pi/2, \psi_C = \pi/6, \psi_D = \pi/3, \rho_A = 1, \rho_B = 2, T = 1, p = 1$. Решение задачи иллюстрируется на рис. 1.

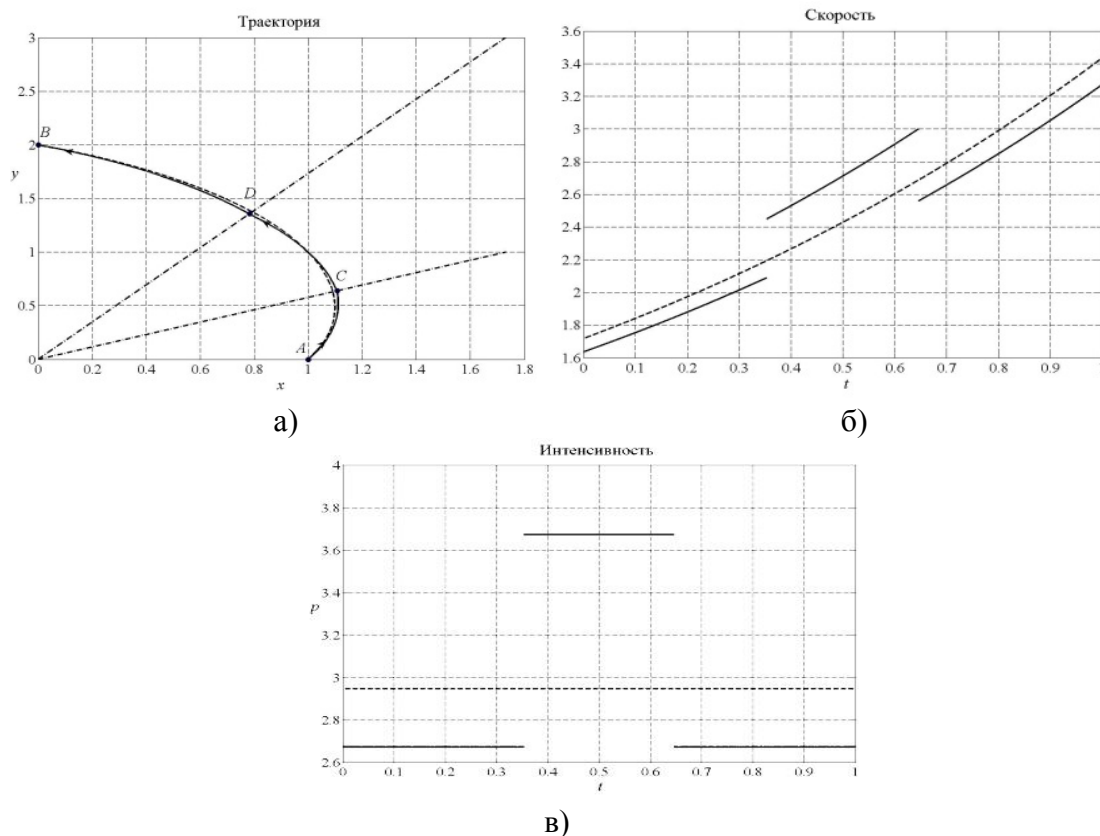


Рис. 1. Графики, построенные на основе аналитического решения задачи для поискового средства вида «сектор»: а) траектория, б) скорость движения подвижного объекта, в) интенсивность поиска.

Границы «сектора» показаны штрих-пунктирной линией. Пунктирной линией обозначены траектория и скорость ПО в отсутствии поискового средства. Внутри сектора, границы которого показаны на рисунке пунктирной линией, действует поисковое средство с $p = 1$. Точечной линией показаны траектория и скорость ПО в отсутствии поискового средства, сплошной линией показаны оптимальная траектория и оптимальный скоростной режим ПО. Видно, что при заданных условиях задачи траектория меняется незначительно, а скоростной режим является разрывной функцией и существенно отличается от режима в отсутствии поискового средства.

Значение функционала на оптимальной траектории равно $R = 3.4357$, на оптимальной траектории в отсутствии поискового средства $R_0 = 2.9481$.

Кольцо – зона действия маневренных средств. Пусть между начальной точкой A и конечной точкой B маршрута движения подвижного объекта находится область действия маневренного средства, заданная в виде

$$Q = \{(\psi, \rho): \psi \in [0, 2\pi], \rho \in (\rho_C, \rho_D)\}.$$

Границей множества Q являются окружности

$$Q_C = \partial Q = \{(\psi, \rho): \psi \in [0, 2\pi], \rho = \rho_C\},$$

$$Q_D = \partial Q = \{(\psi, \rho): \psi \in [0, 2\pi], \rho = \rho_D\}.$$

В задаче получено аналитическое решение. Возьмем те же граничные условия, что и в предыдущем примере, $\psi_A = 0$, $\psi_B = \pi/2$, $\rho_B = 2$, $T = 1$, $p = 1$. Решение задачи иллюстрируется на рис. 2. Значение функционала на оптимальной траектории $R = 3.2449$.

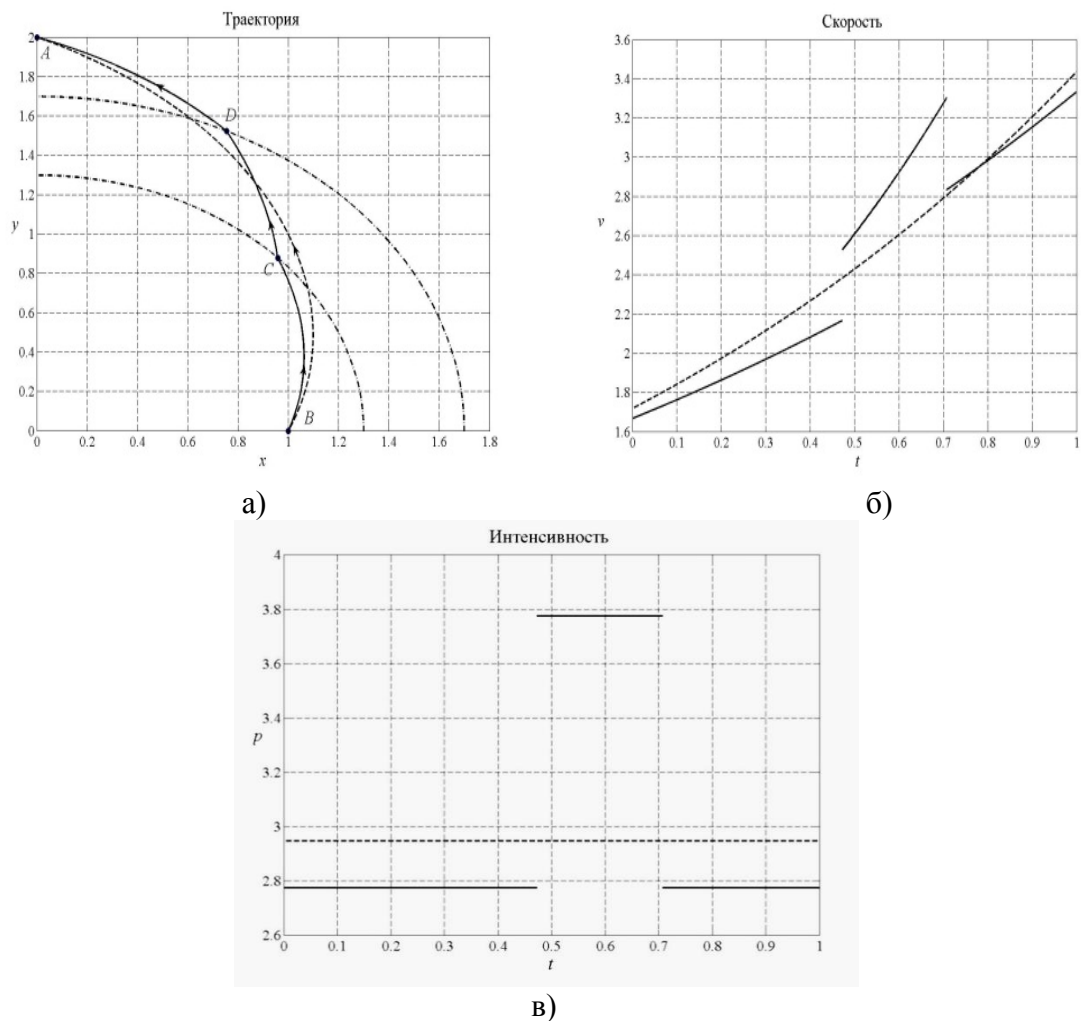


Рис. 2. Графики, построенные на основе аналитического решения задачи для системы «сенсор – поисковое средство, действующее внутри «кольца»»: а) траектория ПО, б) скорость движения ПО, в) интенсивность поиска маневренного поискового средства. Границы «кольца» показаны штрих-пунктирной линией. Пунктирной линией обозначены траектория и скорость ПО в отсутствие поискового средства.

Внутри кольца, границы которого показаны на рисунке пунктирной линией, действует поисковое средство с $p = 1$. Точечной линией показаны траектория и скорость ПО в отсутствие поискового средства, сплошной линией показаны оптимальная траектория и оптимальный скоростной режим ПО. Видно, что при заданных условиях задачи ПО его скоростной режим является разрывной функцией и сильно отличается от режима в отсутствие поискового средства.

4. Заключение

В предположении о том, что противник использует для обнаружения лишь алгоритмы первичной обработки наблюдаемых сигналов приведены решения задач оптимизации законов уклонения ПО от обнаружения однородными и/или разнородными наблюдателями. Представляется, что в ходе дальнейших исследований будут решаться задачи оптимизации законов уклонения для случаев использования противником циф-

ровых алгоритмов обработки информации и алгоритмов вторичной обработки сигналов.

Список литературы

1. Caccetta L., Loosen I., Rehbock V. Optimal Transit Path Problem for Submarines // Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Applications and Computational Algorithms. 2005. P. 785-802.
2. Zabaranin M., Uryasev S., Pardalos P. Optimal Risk Path Algorithms // Cooperative Control and Optimization. Ch.1 / Eds. Murphey R., Pardalos P. Dordrecht: Kluwer Acad. 2002. P. 271-303.
3. Pachter L.S., Pachter M. Optimal Paths for Avoiding a Radiating Source // Proceedings 40 IEEE Conference Des. and Contr. 2001. P. 3581-3586.
4. Zabaranin M., Uryasev S., Murphey R. Aircraft Routing under the Risk of Detection // Naval Research Logistics. 2006. Vol. 53, No. 8. P. 728-747.
5. Meguerdichian S., Koushanfar F., Qu. G. Exposure in Wireless Ad-hoc Sensor Networks // Proceedings of the 7th International Conference MobiCom '01. 2001. P. 139-150.
6. Veltri G., Huang Q., Potkonjak M. Minimal and Maximal Exposure Path Algorithms for Wireless Embedded Sensor Networks // Proceedings of the International Conference Sensor Systems SenSys'03. 2003. P. 242-249.
7. Hallam C., Harrison R., Ward J. A Multiobjective Optimal Path Algorithm // Digital Signal Processing. 2001. Vol. 11, No. 2. P. 133-143.
8. Воронин А.Н., Ясинский А.Г., Шворов С.А. Синтез компромиссно-оптимальных траекторий мобильных роботов в конфликтной среде // Проблемы управления и информатики. 2002. № 8. С. 12-18.
9. Якушенко Е.И., Гурьев Ю.В. и др. Бортовой комплекс управления скрытностью морских подводных объектов с оперативно-советующей системой // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 10. С. 9-16.
10. Галяев А.А., Маслов Е.П., Рубинович Е.Я. Об одной задаче управления движением объекта в конфликтной среде // Известия РАН. Теория и Системы управления. 2009. № 3. С. 134-140.
11. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. М.: Сов. Радио. 1977. 334 с.
12. Галяев А.А., Маслов Е.П., Яхно В.П. Абрамянц Т.Г., Уклонение подвижного объекта от обнаружения системой наблюдателей: сенсор – маневренное средство // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 113-126.