

УДК 519.234:621.391
DOI: 10.17223/19988605/55/9

И.М. Рудько

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В КОНФЛИКТНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ ПО ВЕРОЯТНОСТНОМУ КРИТЕРИЮ СКРЫТНОСТИ

Рассмотрена задача выбора траектории движения маневрирующего объекта и закона изменения его скорости при движении объекта в трехмерной анизотропной среде распространения сигнала, когда его пытаются обнаружить несколько наблюдателей, расположенных в заданном районе. Критерием выбора траектории объекта служит вероятность его обнаружения на всей траектории ни одним из наблюдателей. Предложен трехшаговый последовательный дискретный метод оптимизации этого критерия на основе принципа динамического программирования.

Ключевые слова: траектория движения объекта; вероятность обнаружения объекта на траектории; анизотропная среда; динамическое программирование.

Рассматриваемая задача относится к классу задач об управлении, получивших в отечественной литературе название задач управления подвижными объектами в конфликтной среде [1, 2]. Под конфликтной средой понимается совокупность объектов (они называются конфликтующими), сближение с которыми для управляемого объекта нежелательно в ходе выполнения им основной задачи. Минимизация негативного воздействия конфликтующих объектов на управляемый объект является целью управления. Эта цель достигается путем выбора маршрута его движения, параметров движения и (или) режимов работы технических средств. Задачи об оптимизации закона уклонения подвижного объекта от обнаружения рассматривались в ряде работ, отличающихся предположениями о характеристиках информационных полей, в которых происходит обнаружение [1–6].

В работах [3, 5, 6] рассматриваются задачи уклонения применительно к обработке гидроакустической информации. Как известно, распространение гидроакустического сигнала происходит в анизотропной среде, которая обладает контрастной структурой с чередованием зон акустической освещенности и зон акустической тени [7].

Чаще всего в качестве критерия решения задачи используется вероятностный критерий. Удобство его использования определяется тем, что он позволяет получать не только текущие локальные, но и интегральные оценки потенциальной возможности обнаружения объекта поиска по траектории, т.е. маршруту (в горизонтальной плоскости) и трассе (по глубине) следования.

В работах [5, 6] предлагается дискретный метод оптимизации этого критерия при решении задачи об оптимизации закона уклонения морского подводного объекта (МПО) от обнаружения несколькими независимыми стационарными наблюдателями (СГАС) и маневренными средствами (МС) на основе принципа динамического программирования (ДП) для изотропной [5] и анизотропной [6] среды. Считается, что время движения МПО ограничено известной величиной. В [5] рассмотрена аппроксимация путями графа, вершины которого равномерно покрывают район. При решении задачи ДП для каждого ребра графа ДП по известным параметрам (координаты (x, y) начала и конца ребра, глубина $h_{\text{ист}}$, скорость $V_{\text{ист}}$) вычисляется вероятность обнаружения $P_{\text{обн}i}$ для i -го наблюдателя, и затем находится интегральная вероятность обнаружения для независимых наблюдений [8]:

$$P_{\text{обн}} = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P_{\text{обн}i}), \quad (1)$$

где L – число наблюдателей. Таким образом, задача оптимизации решается с использованием 4-мерного вектора $[x, y, h_{\text{ист}}, V_{\text{ист}}]$.

В настоящей работе предлагается подход к решению задачи об оптимизации закона уклонения МПО от обнаружения несколькими СГАС и МС для случая, когда известно единое поле вероятности обнаружения для всего района, пересекаемого МПО. Вектор управлений МПО включает траекторию уклонения и закон изменения скорости V на траектории.

1. Оптимизация закона уклонения в изотропном поле

Зададим закон движения МПО от начальной точки A до точки назначения B за время T параметрическими уравнениями

$$x = x(t), y = y(t), 0 \leq t \leq T, \quad x(0) = x_A, y(0) = y_A.$$

Поскольку параметром является время, то тем самым задается также закон изменения вектора скорости $(\dot{x}(t), \dot{y}(t))$. Качество маневрирования объекта будем характеризовать вероятностью того, что за время прохождения объектом маршрута его не обнаружит ни один из наблюдателей, контролирующих район. Будем называть ее вероятностью необнаружения, обозначив через $P_{\text{необн}}$. Зависимость этой вероятности от закона движения будем определять в предположении, что в районе расположено N СГАС в пунктах с координатами (x_k, y_k) , $k = 1, \dots, N$. Оптимальный закон движения из начального пункта в конечный ищется из условия максимума $P_{\text{необн}}$ или, что то же самое, из условия минимума вероятности $P_{\text{обн}} = 1 - P_{\text{необн}}$ того, что при прохождении маршрута объект будет обнаружен хотя бы одним из наблюдателей.

Расстояние, на котором вероятность правильного обнаружения сигнала $P_{\text{обн}}$ равна установленному значению при соблюдении требований к вероятности ложных тревог $P_{\text{лт}}$, принято называть дальностью действия ГАС [9]. Данное определение в общем виде относится к однократному наблюдению (взгляду) при установленных зависимостях между временем накопления T_0 , отношением сигнал / помеха ρ и заданных $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{лт}}$.

Для случая многократных последовательных независимых наблюдений (вероятность наступления события обнаружения хотя бы один раз за серию наблюдений) оценки производятся по формуле интегральной (кумулятивной) вероятности (1).

Из основного уравнения гидролокации (ОУГ) [10] для однократного наблюдения в [5] получено выражение для вероятности правильного обнаружения как функции от дальности для изотропного поля:

$$P_{\text{обн}}(r) = 1 - F_n\left(\frac{h_0}{1 + \rho}\right), \quad (2)$$

где $F_n(\cdot)$ – функция χ^2 -распределения с n степенями свободы, ρ – отношение сигнал / помеха; h_0 – квантиль уровня $(1 - \alpha)$, $\alpha = P_{\text{лт}}$, n – число степеней свободы, которое в случае цифровой обработки определяется из условий $T = n\Delta t$, $\Delta t = 1/\Delta F$, Δt – интервал дискретизации по времени, ΔF – полоса пропускания входного фильтра системы обнаружения, а в случае аналоговой обработки определяется как $n = 2T\Delta F$.

При заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}} = \alpha$ вероятность правильного обнаружения $P_{\text{обн}}$ возрастает с увеличением ρ , а ρ монотонно убывает с ростом расстояния r до цели. Задаваясь минимально обнаруживаемым сигналом, т.е. минимальным значением ρ_{min} , можно найти максимальную дальность обнаружения R_{max} . При $r \geq R_{\text{max}}$ цель не может быть обнаружена с заданной вероятностью α , а при $r \leq R_{\text{max}}$ обнаружение происходит с вероятностью, не меньшей $P_{\text{обн}}$ при заданном значении α . Пределом R_{max} является расстояние r , для которого $P_{\text{обн}} = P_{\text{лт}} = \alpha$, так как обнаружение с вероятностью меньшей, чем $P_{\text{лт}}$, теряет смысл.

Расстояние r можно условно разбить на три участка:

- $0 < r \leq R_{\text{min}}$, на котором объект будет обнаружен с заданной $P_{\text{обн}}$ за одно или, в худшем случае, за заданное число разовых наблюдений (1) – зона устойчивого обнаружения;
- $r \geq R_{\text{max}}$, на котором скрытность объекта максимальна ($P_{\text{обн}} \leq P_{\text{лт}}$) – зона необнаружения;
- $R_{\text{min}} \leq r \leq R_{\text{max}}$ – зона неустойчивого обнаружения.

Таким образом, объект следует считать видимым лишь вне зоны необнаружения, а задача оптимизации траектории движения имеет смысл лишь в зоне неустойчивого обнаружения.

Единое поле вероятности обнаружения для всех наблюдателей, контролирующих заданный район, $P_{\text{обн}}(x, y)$ может быть вычислено следующим образом. Пусть имеются два наблюдателя с шириной полосы частот ΔF_1 и ΔF_2 и со временами накопления T_1 и T_2 ($T_1 \neq T_2$) соответственно, в которых решение об обнаружении принимаются независимо. Для расчета вероятности совместного обнаружения хотя бы одним из двух наблюдателей, чтобы использовать формулу (1), нужно одинаковое время накопления, но $T_1 \neq T_2$. Определим наименьшее общее кратное – НОК(T_1, T_2) = T_0 . Тогда $T_0 - L_1 = T_0/T_1$ – число взглядов для 1-го наблюдателя, $L_2 = T_0/T_2$ – число взглядов для 2-го наблюдателя.

Для 1-го наблюдателя, считая, что цель неподвижна, согласно (1) за время T_0 получаем

$$P_{\text{необн}1}(T_0) = \prod_{i=1}^{L_1} P_{\text{необн}1}(T_1) = [P_{\text{необн}1}(T_1)]^{L_1}, \quad (3)$$

а для 2-го наблюдателя за время T_0

$$P_{\text{необн}2}(T_0) = \prod_{i=1}^{L_2} P_{\text{необн}2}(T_2) = [P_{\text{необн}2}(T_2)]^{L_2}.$$

Допустим, что у нас есть 3-й наблюдатель, который имеет время наблюдения T_2 и за время T_0 обеспечивает по формуле (3) такую же вероятность необнаружения $P_{\text{необн}}$, как и 1-й наблюдатель, т.е.

$$[P_{\text{необн}3}(T_2)]^{L_2} = [P_{\text{необн}1}(T_1)]^{L_1} \text{ и } P_{\text{необн}3}(T_2) = [P_{\text{необн}1}(T_1)]^{L_1/L_2} = [P_{\text{необн}1}(T_1)]^{T_2/T_1}.$$

Третий наблюдатель эквивалентен 1-му наблюдателю в том смысле, что рассчитанные для них по формуле (3) за время T_0 вероятности необнаружения $P_{\text{необн}}$ равны между собой. Так как время наблюдения – T_2 – для 3-го наблюдателя равно времени наблюдения для 2-го наблюдателя, то для определения интегральной вероятности для независимых наблюдателей можно применить формулу (1):

$$P_{\text{необн}(1+2)} = P_{\text{необн}2}(T_2)P_{\text{необн}3}(T_2) = P_{\text{необн}2}(T_2)[P_{\text{необн}1}(T_1)]^{T_2/T_1}. \quad (4)$$

Таким образом, вероятности необнаружения для двух СГАС с различными временами взглядов можно объединить, используя формулу (4), в $P_{\text{необн}}$ с единым временем взгляда.

Пусть СГАС, расположенные в районе, имеют координаты (x_k, y_k) . Тогда, используя формулу для вычисления $P_{\text{обн}}(d_i)$, приведенную в [5], можно рассчитать вероятность необнаружения для всех точек района (x, y) , т.е. сформировать поле (матрицу) вероятностей необнаружения $P_{\text{необн}}(x, y)$:

$$P_{\text{необн}}(x, y) = \sqrt{a^2 + b^2} \lim_{x \rightarrow \infty} \prod_{k=1}^K P_{\text{необн}k}(x_k, y_k)^{T_M/T_k}, \quad (5)$$

где K – число наблюдателей, $T_M = \max[T_k]$, T_k – длительность взгляда для k -го наблюдателя, (x_k, y_k) – координаты k -го наблюдателя, $P_{\text{необн}k}$ – вероятности необнаружения для k -го наблюдателя.

В качестве примера на рис. 1 приведены вероятности обнаружения (карта вероятностей) $P_{\text{обн}}(x, y) = 1 - P_{\text{необн}}(x, y)$ для трех независимых наблюдателей (СГАС), расположенных в заданном районе, в случае однократного наблюдения с использованием формулы (5).

На рис. 1 зона необнаружения выделена зеленым цветом, а зона обнаружения – коричневым. Границы зоны неустойчивого обнаружения определены из условий: $R_{\min} - P_{\text{обн}} = 0,5$, $R_{\max} - P_{\text{обн}} = 0,02$. Приведены также четыре возможных маршрута – 2 маршрута, обходящих районы СГАС, и 2 – проходящих между ними.

Шумность МПО зависит от скорости V , следовательно, карта вероятности (см. рис. 1) будет относительно координат k -ой СГАС изменяться: с ростом V граница зоны необнаружения будет расширяться, а с уменьшением V – сжиматься.

Учитывая, что обычно траектория объекта проходит на достаточно больших расстояниях от наблюдателя и $(1/r^2)$ является малой величиной, как показано в [11], можно разложить функцию зависимости изменения вероятности обнаружения $P_{\text{обн}}$ от дистанции r – $P_{\text{обн}}(r)$ в ряд по степеням $(1/r^2)$ и ограничиться несколькими членами разложения. В первом приближении имеем

$$P_{\text{обн}}(r) = \alpha + \frac{\gamma V^\mu}{\sigma_{\text{ш}}^2} \cdot \frac{(\chi_{1-\alpha,n}^2)^{\frac{n}{2}}}{2^{n/2} \Gamma(\frac{n}{2})} e^{-\frac{\chi_{1-\alpha,n}^2}{2}} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad (6)$$

где $\chi_{1-\alpha,n}^2 - (1 - \alpha)$ – квантиль χ^2 -распределения с n степенями свободы, $\sigma_{\text{ш}}^2$ – дисперсия помехи, γV^μ – зависимость шумности МПО от его скорости V , γ и μ – некоторые размерные коэффициенты.

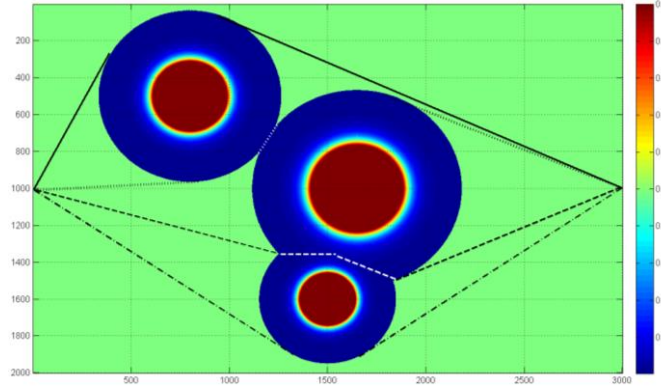


Рис. 1. Вероятности правильного обнаружения (карта вероятностей) $P_{\text{обн}}(x, y)$
Fig. 1. Probabilities of correct detection (probability map) $P_{\text{det}}(x, y)$

Рассмотрим прохождение МПО между двумя СГАС с перекрывающимися зонами наблюдения. Пусть расстояние между СГАС – R_0 . Тогда из (6) для 1-й и 2-й СГАС соответственно получаем

$$P_{\text{обн1}}(r) = \alpha_1 + V^\mu C_1 \frac{1}{r^2}, \quad P_{\text{обн2}}(r) = \alpha_2 + V^\mu C_2 \frac{1}{(R_0 - r)^2}. \quad (7)$$

В обобщенный параметр C_1 сведены все параметры ОУГ, относящиеся к первому СГАС, а в параметр C_2 – относящиеся ко второму СГАС. При выполнении условий $P_{\text{обн1}} = P_{\text{обн2}}$ и $\alpha_1 = \alpha_2$ параметры, относящиеся к МПО (шумность, зависящая от скорости V), сокращаются. Таким образом, положение $\min[P_{\text{обн}}(r)]$ от скорости МПО не зависит.

На рис. 2 приведен пример изменения вероятности обнаружения от скорости, где для различных скоростей V по формуле (5) рассчитана суммарная однократная вероятность обнаружения на линии, соединяющей два СГАС. Положение минимума интегральной вероятности (5) при изменении скорости не меняется, а величины $\min(P_{\text{обн}})$ растут с ростом V_k .

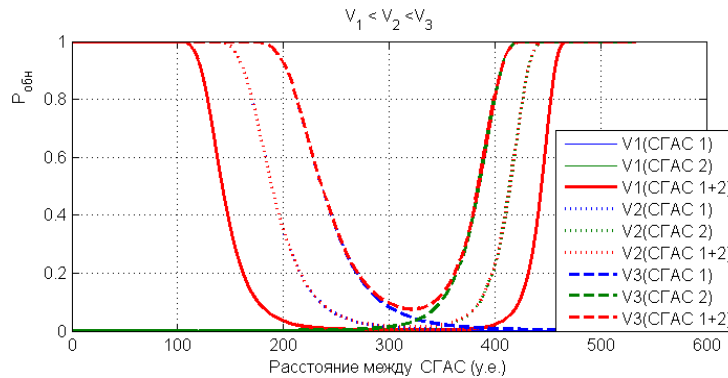


Рис. 2. Суммарная вероятность обнаружения $P_{\text{обн}}$ для двух СГАС
Fig. 2. The total probability of detection of P_{det} for two SSS

Таким образом, маршрут, проложенный между двумя СГАС с перекрывающимися полями обнаружения (см. рис. 1), не зависит от скорости V и должен проходить через точки карты вероятностей, обеспечивающие $\min(P_{\text{обн}}(x, y))$. Или, используя географическую терминологию, проходить по «дну долин» и через «перевалы» карты вероятностей.

Оптимизация маршрута по вероятностному критерию производится методом ДП [5]. В результате решения задачи получаем несколько синтезированных кусочно-прямолинейных субоптимальных маршрутов движения МПО (r_{Mi}), каждый из которых при фиксированной скорости V будет характеризоваться $P_{обн}(x, y)$ и временем перехода T_{Mi} .

Наличие ограничений на время перехода T_M требует проведения для каждого маршрута оптимизации по скорости V , которая также производится методом ДП.

2. Оптимизация закона уклонения в анизотропном поле

Предположение об изотропности гидроакустического поля справедливо лишь для однородной среды, в этом случае дальность обнаружения зависит только от расстояния между МПО и наблюдателем. В неоднородной среде дальность обнаружения зависит не только от расстояния между МПО и наблюдателем, но также от других параметров, таких как глубина и профиль дна, акустические свойства грунта, от гидрологических, определяемых видом вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), и метеорологических условий наблюдения, глубины погружения МПО, характеристик СГАС и глубины установки ее антенны и ряда других факторов [7]. Как результат влияния этих факторов круговая диаграмма, присущая изотропному полю, деформируется и зависит уже от четырех параметров: расстояния между МПО и наблюдателем (r), глубины погружения МПО ($h_{ист}$), азимута на МПО и глубины установки антенны СГАС ($h_{пр}$).

Кроме обратной квадратичной зависимости затухания сигнала от дистанции, для каждой фиксированной дистанции r в анизотропном поле необходимо учитывать также перераспределение энергии сигнала по глубине, вызванное непосредственно анизотропией поля [7] и зависящее от дистанции r и глубин источника $h_{ист}$ и приемника $h_{пр}$, – коэффициент анизотропии $\gamma(h_{пр}, r, h_{ист})$.

Для учета анизотропии поля в формулу (2) необходимо ввести значение коэффициента анизотропии $\gamma(h_{пр}, r, h_{ист})$. Тогда вероятность правильного обнаружения как функции от дальности (2) для анизотропного поля преобразуется к виду:

$$P_{обн}(h_{ист}, r, h_{пр}) = 1 - F_n \left(\frac{h_0}{1 + \rho_A} \right) = 1 - F_n \left(\frac{h_0}{1 + \rho \gamma(h_{пр}, r, h_{ист})} \right), \quad (8)$$

где ρ_A – отношение сигнал / помеха в анизотропном поле.

Задача расчета вероятности обнаружения в анизотропной среде хорошо разделяется на две независимые задачи: расчет анизотропного поля по заданной гидрологии и расчет вероятности обнаружения с учетом коэффициента анизотропии поля.

Такое разделение очень важно с учетом того, что гидрологические характеристики района остаются «квазистационарными» достаточно длительное время (от нескольких часов до многих суток), а сам расчет анизотропного поля требует очень большого объема вычислений. В то же время расчет вероятности обнаружения с учетом коэффициента анизотропии поля требует значительно меньшего объема вычислений и может проводиться в режиме online.

На рис. 3 в качестве примера приведены карты вероятности правильного обнаружения $P_{обн}(r, h_{ист}, h_{пр})$ для СГАС с антенной, расположенной на глубине $h_{пр}$, и двух заданных глубин – $h_{ист1}$ и $h_{ист2}$. Хорошо видно, что $P_{обн}$ зависит от глубины МПО и азимута на МПО. Следовательно, для анизотропного (слоисто-неоднородного) поля необходимо иметь набор карт вероятности $P_{обн}$ для дискретного ряда глубин ПЛ – $h_{ист1}, \dots, h_{истj}, \dots, h_{истJ}$. Таким образом, если для изотропного поля карты вероятности обнаружения $P_{обн}$ строятся в координатах (x, y) , то для анизотропного поля необходимо иметь набор из J карт, рассчитанных по формуле (8), в координатах (x, y) для ряда фиксированных глубин $h_{истj}$. Такой набор карт вероятности можно описывать трехмерной матрицей в координатах $(x, y, h_{ист})$ при фиксированных глубинах наблюдателей $h_{прi}$.

На рис. 4 приведены вероятности обнаружения $P_{обн}(x, y)$ в анизотропном поле для двух СГАС, расположенных в заданном районе, для заданной глубины $h_{ист}$. В качестве примера на этом же рисунке показан маршрут, который мог бы проложить оператор при условии минимизации вероятности обнаружения МПО при переходе их точки координатами $(0, 0)$ в точку $(500, 500)$.

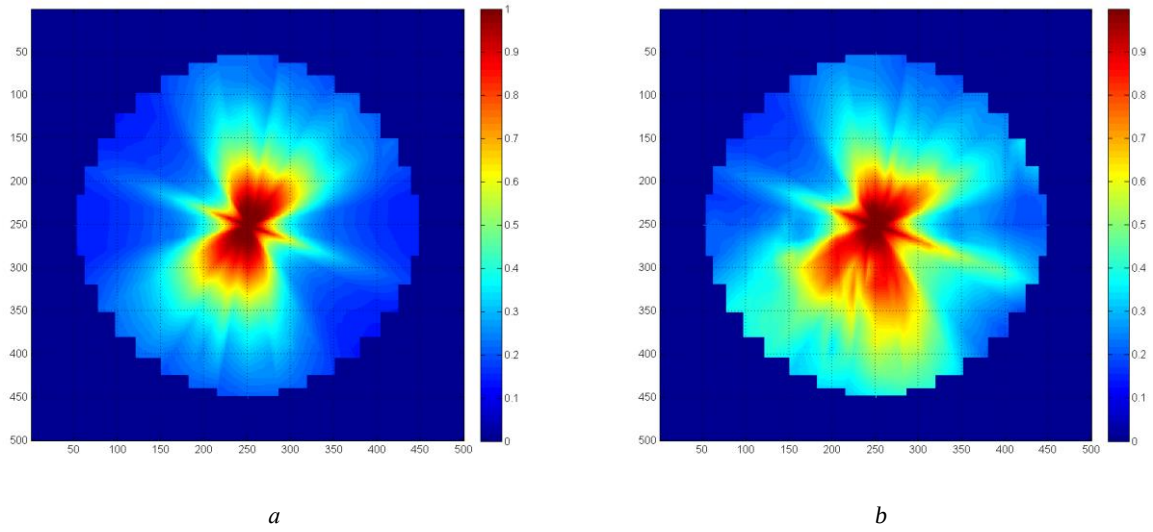


Рис. 3. Карты вероятности обнаружения $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}}, h_{\text{пр}})$: $a - h_{\text{ист}1}$, $b - h_{\text{ист}2}$
 Fig. 3. Probability maps of detection $P_{\text{det}}(x, y, h_{\text{orig}}, h_{\text{rec}})$: $a - h_{\text{orig}1}$, $b - h_{\text{orig}2}$

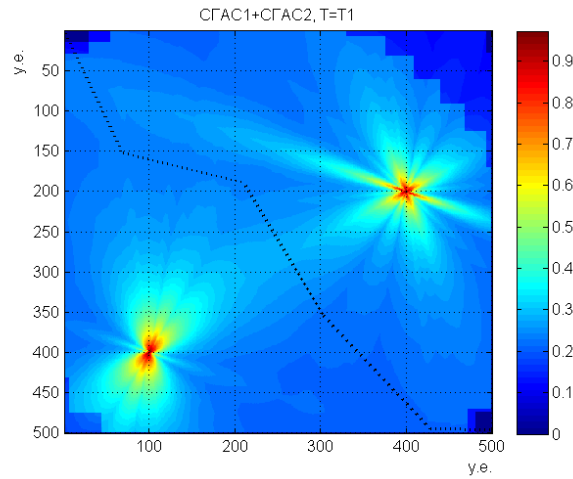


Рис. 4. Суммарное поле вероятности обнаружения для 1-го и 2-го наблюдателей по формуле (2)
 Fig. 4. The total field of probability of detection for the 1st and 2nd observer according to the formula (2)

Так же, как было показано выше для изотропного поля (см. рис. 1 и соответствующие формулы), рассмотрим прохождение МПО между двумя СГАС с перекрывающимися зонами наблюдения для анизотропного поля. Как следует из формулы (6), в ОУГ влияние анизотропии учитывается при расчете ρ_A – отношения сигнал / помеха в анизотропном поле. В свою очередь, ρ_A зависит от скорости МПО V и коэффициента анизотропии $\gamma(h_{\text{пр}}, r, h_{\text{ист}})$. Очевидно, что коэффициент анизотропии от скорости МПО не зависит и может быть учтен при расчете параметров C_1 и C_2 . Таким образом, в анизотропном поле положение $\min[P_{\text{обн}}(r)]$ также не зависит от скорости МПО.

На рис. 5, a для этого сечения приведены $P_{\text{обн}}$, рассчитанные при одинаковой скорости МПО для различных глубин $h_{\text{ист}}$, а также $P_{\text{обн}}$ для соответствующего изотропного поля. При изменении глубины МПО положение минимума вероятности $\min(P_{\text{обн}}(h_{\text{ист}}))$ практически не меняется, поэтому маршруты для различных глубин $h_{\text{ист}}$ при прохождении между двумя СГАС практически совпадают.

На рис. 5, b приведено (при фиксированной скорости МПО) сечения матрицы $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}})$ по линии (r) , соединяющей два СГАС, в координатах $(r, h_{\text{ист}})$, т.е. 2-мерная матрица, где по формуле (8) рассчитана интегральная вероятность обнаружения $P_{\text{обн}}(r, h_{\text{ист}})$. (Профиль дна окрашен в цвет, соответствующий $P_{\text{обн}} = 1$.)

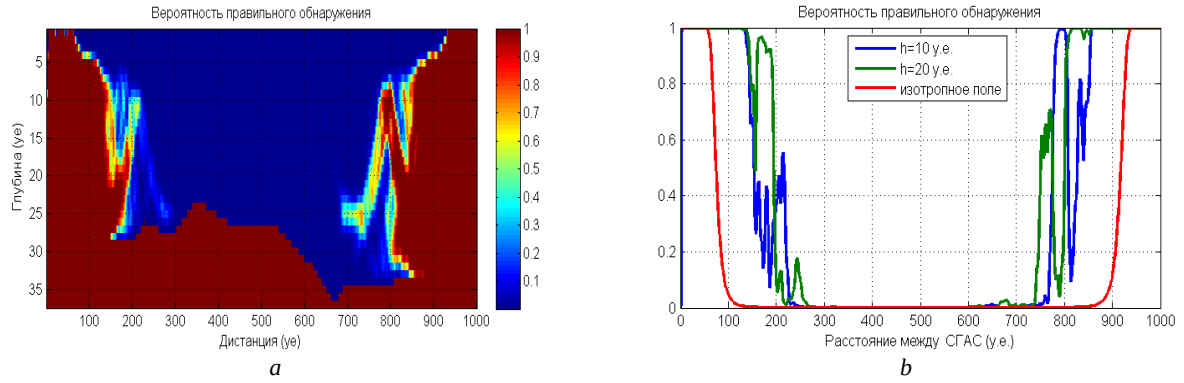


Рис. 5. Вероятности обнаружения $P_{\text{обн}}$ для различных глубин $h_{\text{ист}}$ при прохождении между двумя СГАС (a) и сечение матрицы $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}})$ по линии, соединяющей две СГАС (b)

Fig. 5. P_{det} detection probabilities for various depths of h_{orig} when passing between two SSS (a); the section of the matrix $P_{\text{det}}(x, y, h_{\text{orig}})$ along the line connecting the two SSS (b)

Рассмотрим сечение матрицы $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}})$ по маршруту, проходящему, как показано на рис. 4, между двух СГАС – $P_{\text{обн}}(r_M, h_{\text{ист}})$. На рис. 6 приведен пример такого сечения. Это сечение также можно рассматривать как карту вероятности обнаружения $P_{\text{обн}}$, но уже не в координатах (x, y) , а в координатах $(r_M, h_{\text{ист}})$, где r_M – маршрут, $h_{\text{ист}}$ – глубина, по которой аналогично построению маршрута методом ДП вычисляется набор возможных трасс, одна из которых приведена на рис. 6.

Для изотропного поля изменение скорости МПО при прохождении между двумя СГАС не приводит к изменению маршрута. При расчете вероятности $P_{\text{обн}}$ для анизотропного поля учитывается фактор аномалии, входящий, как один из параметров, в ОУГ [9]. При определении $\min[P_{\text{обн}}(r)]$ между двумя СГАС для анизотропного поля получаем уравнение, аналогичное (7), в котором параметры, характеризующие факторы аномалии, входят в параметры C_1 и C_2 соответствующих СГАС. Следовательно, положение $\min[P_{\text{обн}}(r)]$ для анизотропного поля также **не зависит от скорости МПО**.

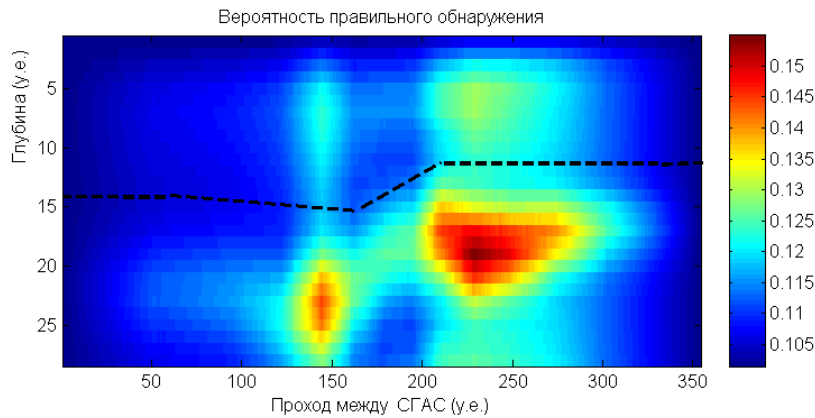


Рис. 6. Сечение матрицы $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}})$ по маршруту $r_M - P_{\text{обн}}(r_M, h_{\text{ист}})$
Fig.6. The cross section of the matrix $P_{\text{det}}(x, y, h_{\text{orig}})$ along the route $r_M - P_{\text{det}}(r_M, h_{\text{orig}})$

С учетом перебора по скоростям V_k можно построить 4-мерную карту (матрицу) $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}}, V)$, которая для заданного района может быть рассчитана заранее для фиксированного набора глубин $h_{\text{ист}j}$ и скоростей V_k МПО при известных координатах наблюдателей и их технических характеристиках, гидрофизических характеристиках района (ВРСЗ, карта глубин, метеорологические условия наблюдения и ряд других факторов).

Таким образом, рассматриваемый алгоритм построения оптимальной траектории с использованием матрицы вероятности (риска) $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}}, V)$ выполняется за три последовательных этапа:

1. Построение маршрута r_M по карте $P_{\text{обн}}(x, y)$ – сечению матрицы $P_{\text{обн}}(x, y, h_{\text{ист}}, V)$ при $h_{\text{ист}} = \text{const}$, $V_k = \text{const}$.

2. Построение для выбранного маршрута r_M трассы по $h_{ист}$ по карте $P_{обн}(r_M, h_{ист})$ – сечению матрицы $P_{обн}(x, y, h_{ист}, V)$ по r_M при $V_k = \text{const}$.

3. Расчет для выбранной траектории $T_{rh}(r_M, h_{ист})$ оптимальной скорости V_k по карте $P_{обн}(T_{rh}, V)$ – сечению матрицы $P_{обн}(x, y, h_{ист}, V)$ по T_{rh} .

Такая последовательная структура алгоритма позволяет существенно уменьшить объем вычислений при построении оптимальной траектории по сравнению, например, с работой [5], где оптимизация производится одновременно по четырем параметрам: $x, y, h_{ист}, V$. Общее число двумерных карт вероятности $P_{обн}(x, y)$ определяется размерами векторов глубин $h_{ист}$ и скоростей V , т.е. $(J \times K)$.

Кроме того, расчеты на первых двух этапах (расчет траектории) *желательно* проводить при оптимальных для наблюдателей условиях – при движении ПЛ с максимально допустимой скоростью в подводном звуковом канале (если он есть). Эти условия позволяют производить ДП при максимально узких «долинах» и «перевалах» карты вероятности и, следовательно, более точно рассчитать маршрут и трассу (см. рис. 4, 6).

Заключение

Важной особенностью алгоритма является то, что наиболее трудоемкие расчеты вероятностей для анизотропного поля вынесены на предварительный этап решения задачи оптимизации.

Рассматриваемый алгоритм может применяться для решения задачи оптимизации маршрута в режиме online и позволяет корректировать расчеты в случае появления новых наблюдателей.

Алгоритм ориентирован на условия известного взаимного положения и движения объектов.

Алгоритм построения оптимальной траектории универсален, поскольку он не зависит от количества средств обнаружения, их взаимного расположения, их параметров, при условии наличия моделей для расчетов вероятностей обнаружения объекта этими средствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Галяев А.А., Маслов Е.П. Оптимизация законов уклонения подвижного объекта от обнаружения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 4. С. 52–62.
3. Какалов В.А., Поленин В.И., Дымент А.Б., Сергеев В.А. Метод оптимизации боевого маневрирования подводной лодки по вероятностному критерию скрытности. // Морская радиоэлектроника. 2003. № 3 (6). С. 44–47.
4. Zabaranin M., Uryasev S., Pardalos P. Optimal Risk Path Algorithms // Cooperative Control and Optimization / eds. R. Murphey, P. Pardalos. Dordrecht : Kluwer Acad., 2002. Ch. 1. P. 273–298.
5. Добровидов А.В., Кулида Е.Л., Рудько И.М. Выбор траектории движения объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. 2011. № 3. С. 64–75.
6. Добровидов А.В., Кулида Е.Л., Рудько И.М. Оптимизация траектории движения объекта по вероятностному критерию в режиме пассивной гидролокации в анизотропной среде // Проблемы управления. 2014. № 4. С. 31–37.
7. Сташкевич А.П. Акустика моря. Л. : Судостроение, 1966. 350 с.
8. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. М. : Сов. радио, 1977. 336 с.
9. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Ляликов А.П. Справочник по гидроакустике. Л. : Судостроение, 1988. 552 с.
10. Burdic W.S. Acoustic system analysis. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, Inc., 1984. 392 p.
11. Сысоев Л.П. Критерий вероятности обнаружения на траектории в задаче управления движением объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. 2010. № 6. С. 65–72.

Поступила в редакцию 12 августа 2020 г.

Rudko I.M. (2020) OPTIMIZATION OF THE TRAJECTORY OF THE OBJECT IN A CONFLICT ANISOTROPIC MEDIUM ACCORDING TO THE PROBABILISTIC CRITERION OF STEALTH. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 55. pp. 71–79

DOI: 10.17223/19988605/55/9

The problem of choosing the trajectory of a marine moving object (MMO) and the law of change in its velocity during the movement of an object in a three-dimensional anisotropic medium of signal propagation, when several stationary observers (SSS)

are located in a given area, are considered. The criterion for choosing the trajectory of an object is the probability of its non-detection on the entire trajectory by any of the observers.

An approach is proposed to solve the problem of optimizing the law of MMO evasion from detection by several SSSs for the case when a single detection probability field is known for the entire area intersected by MMO. The MMO control vector includes the evasion path and the law of variation of the velocity V on the path.

Relations are derived in the work that make it possible to calculate in a isotropic and anisotropic observation fields a single field (map) of the probability of detecting an object for several SSSs with different technical characteristics. It is shown that for an anisotropic field, the map of the probability of detection can be represented as a 4-dimensional matrix in the coordinates $(x, y, h_{\text{orig}}, V)$, where x, y are the coordinates of the surface of the region, h_{orig} is the depth of MMO, V is the MMO velocity.

It is shown that using the P_{det} detection probability map $(x, y, h_{\text{orig}}, V)$, when solving the problem of dynamic programming (DP) of the route, it is possible to replace the 4-dimensional vector $(x, y, h_{\text{orig}}, V)$, according to which optimization is carried out, on a three-step sequential discrete optimization method based on the principle of DP. In this case, at each of the 3 steps, optimization is performed only for two-dimensional vectors:

- Construction of the r_M route from the P_{det} map (x, y) - to the section of the P_{det} matrix $(x, y, h_{\text{orig}}, V)$ with $h_{\text{orig}} = \text{const}$, $V_k = \text{const}$.

- Construction for the chosen route r_M of the route according to h_{orig} on the P_{det} map (r_M, h_{orig}) - section of the P_{det} matrix $(x, y, h_{\text{orig}}, V)$ along r_M at $V_k = \text{const}$.

- Calculation for the chosen trajectory T_{rh} (r_M, h_{orig}) of the optimal speed V_k according to the P_{det} map (T_{rh}, V) - to the section of the P_{det} matrix $(x, y, h_{\text{orig}}, V)$ according to T_{rh} .

Such a consistent structure of the algorithm can significantly reduce the amount of computation when constructing the optimal trajectory.

Keywords: trajectory of the object; the probability of an object not being detected on the trajectory; anisotropic medium; dynamic programming.

RUDKO Igor Mikhailovich (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, V.A.Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation).

E-mail: igor-rudko@mail.ru

REFERENCES

1. Galyaev, A.A., Maslov, E.P. & Rubinovich, E.Ya. (2009) On one problem of controlling the movement of an object in a conflict environment. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya – Journal of Computer and Systems Sciences*. 3. pp. 134–140.
2. Galyaev, A.A. & Maslov, E.P. (2010) Optimization of a mobile object evasion laws from detection. *Journal of Computer and Systems Sciences*. 4. pp. 52–62.
3. Kakalov, V. A., Polenin, V. I., Dymont, A.B. & Sergeev V.A. (2003) Metod optimizatsii boevogo manevrirovaniya podvodnoy lodki po veroyatnostnomu kriteriyu skrytnosti [A method for optimizing the combat maneuvering of a submarine by the probabilistic stealth criterion]. *Morskaya radioelektronika – Marine Radio electronics*. 3(6). pp. 44–47.
4. Zabaranin, M., Uryasev, S. & Pardalos, P. (2002) Optimal Risk Path Algorithms. In: Murphey, R. & Pardalos, P. (eds) *Cooperative Control and Optimizatoin*. Vol. 1. Dordrecht: Kluwer Acad. pp. 273–298.
5. Dobrovidov, A.V., Kulida, E.L. & Rudko, I.M. (2011) Vybora traektorii dvizheniya ob"ekta v konfliktnoy srede [The choice of the trajectory of the object in a conflict environment]. *Problemy upravleniya – Control Sciences*. 3. pp. 64–75.
6. Dobrovidov, A.V., Kulida, E.L. & Rudko, I.M. (2015) Path optimization for a moving object in an anisotropic environment using the probabilistic criterion in the passive sonar mode. *Automation and Remote Control*. 76(7). pp. 1271–1281. DOI: 10.1134/S0005117915070127
7. Stashkevich, A.P. (1966) *Akustika morya* [Acoustics of the Sea]. Leningrad: Sudostroenie.
8. Abchuk, V.A. & Suzdal, V.G. (1977) *Poisk ob"ektov* [Search for Objects]. Moscow: Sovetskoe radio.
9. Evtuyutov, A.P., Kolesnikov, A.E. & Lyalikov, A.P. (1988) *Spravochnik po gidroakustike* [Handbook of Hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie.
10. Burdic, W.S. (1984) *Acoustic System Analysis*. Prentice. Hall, Inc. Englewood Cliffs.
11. Sysoev, L.P. (2010) Kriteriy veroyatnosti obnaruzheniya na traektorii v zadache upravleniya dvizheniem ob"ekta v konfliktnoy srede [The probability criterion for detection on the trajectory in the task of controlling the movement of an object in a conflict environment]. *Problemy upravleniya – Control Sciences*. 6. pp. 65–72.