



ЕДИНОЕ ПОЛЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЛЯ ГРУППЫ СТАЦИОНАРНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

И. М. Рудько

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

✉ igor-rudko@mail.ru

Аннотация. Исследуется задача вычисления единого поля вероятности обнаружения для группы стационарных наблюдателей, контролирующих заданный район и работающих в активном режиме. Рассматриваются расположенные на плоскости, снабженной декартовой системой координат, стационарные наблюдатели, координаты которых известны, и рассчитывается единое поле вероятности обнаружения объекта, имеющего заданные координаты, для всех стационарных наблюдателей района. Показано, что наибольшую сложность представляют объекты, для которых необходимо учитывать рельеф местности. Если для обнаружения объектов без учета рельефа достаточно однослойной (плоской) карты вероятности обнаружения, то для таких объектов необходим расчет многослойной карты, включающей высоту движения объекта. На примерах показано, что вероятность обнаружения объекта зависит от места и высоты установки наблюдателей, высоты движения объекта наблюдения и рельефа местности. Расчет единого поля вероятности обнаружения для заданного района в виде многослойной карты позволяет существенно упростить как задачу оптимизации расположения наблюдателей, так и задачу управления подвижными объектами в конфликтной среде.

Ключевые слова: вероятность обнаружения объекта, поле вероятности обнаружения объекта, траектория движения объекта, рельеф местности.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач обнаружения объекта в активном режиме используются закономерности распространения радиоволн в пространстве, основными из которых являются: постоянство скорости распространения сигнала; прямолинейность распространения сигнала; направленность излучения и приема сигнала, в основе которой лежит явление интерференции радиоволн; эффект Доплера. При этом зондирующий и отраженный сигналы распространяются по прямолинейной траектории и без искажения своей формы [1]. Дальность прямой видимости для наблюдателя, стоящего на абсолютно ровной поверхности, с учетом кривизны земной поверхности по объекту на высоте 50 м, будет составлять около 39 км и увеличиваться с ростом высоты объекта. Дальность обнаружения объекта, движущегося на высоте 100 м, составит примерно 52-55 км. Для успешного обнаружения движущего-

ся объекта он должен находиться в зоне прямой видимости. По объектам, на обнаружение которых не влияет рельеф местности, можно создать так называемое сплошное поле обнаружения. С учетом рельефа местности сделать это значительно сложнее. Отметим, что в СССР так и не было создано сплошное поле обнаружения даже в европейской части страны. Если движение объекта происходит на предельно малых высотах (ПМВ) – от нескольких десятков до сотен метров [2] – то рельеф местности, лес, здания и сооружения создают так называемые углы закрытия. Сегодня 99 % перемещений движущихся объектов происходит на высотах 200–300 м, а над сильно пересеченной местностью и выше, поскольку используется измерение высоты полета либо по спутниковым системам глобального позиционирования, либо по барометрическим высотомерам. Внедрение лазерных высотомеров позволит снизить эту высоту до 30–50 м, что еще больше затруднит их обнаружение.

Обработка наблюдателем отраженных от объекта сигналов осуществляется в три этапа [1]:

- *Первичная обработка* включает операции обнаружения и измерения (оценки) параметров принимаемых сигналов. Первичная обработка проводится непосредственно наблюдателем. Совокупность оценок параметров сигналов образует отметку от объекта.

- *Вторичная обработка* производится по совокупности отметок и обеспечивает формирование траекторной информации.

- *Третичная обработка* состоит в объединении и отождествлении информации отдельных наблюдателей, входящих в систему, или информации отдельных систем.

В настоящей работе рассматривается задача обнаружения объекта с учетом рельефа местности в районе, контролируемом несколькими стационарными наблюдателями, т. е. рассматривается первичная и третичная обработка.

Зона потенциально возможного обнаружения объекта зависит от рельефа местности, т. е. обладает контрастной структурой, с чередованием зон освещенности (объект в зоне прямой видимости) и зон тени (объект вне зоны прямой видимости). Контрастная структура зоны наблюдения может выражаться любыми показателями – либо как интенсивность полезного сигнала, либо как вероятность обнаружения полезного сигнала, лишь бы они представляли собой корректную свертку всех основных влияющих факторов и были доступны для оценки. Непосредственно такую возможность характеризует **вероятностный критерий**, представляющий собой вероятность такого события, при котором за время прохождения объектом маршрута его обнаружит хотя бы один из L ($L \geq 1$) наблюдателей, расположенных в районе. Обозначим эту вероятность $P_{\text{обн}}$ и будем называть ее вероятностью обнаружения объекта. В случае независимых наблюдателей оценки вероятности наступления события обнаружения хотя бы одним наблюдателем производятся по формуле интегральной (кумулятивной, накопленной) вероятности [3]:

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

где L – число наблюдателей; $P_{\text{обн}i}$ – вероятность обнаружения i -м наблюдателем. Такая задача относится к области третичной обработки. Знание координат расположения наблюдателей позволяет, используя формулу (1), рассчитать интегральную вероятность $P_{\text{обн}}(x, y)$ для всех точек области, контролируемой этими наблюдателями.

В работе [4] рассматриваются расположенные на плоскости, снабженной декартовой системой координат, стационарные средства гидроакустического наблюдения, работающие в пассивном режиме, координаты которых известны, и рассчитывается единое поле вероятности обнаружения объекта для всех стационарных гидроакустических средств по всему району $P_{\text{обн}}(x, y)$ с учетом анизотропии гидроакустического поля.

В настоящей работе рассматриваются расположенные на плоскости, снабженной декартовой системой координат XOY , стационарные наблюдатели, работающие в активном режиме, координаты которых известны, и рассчитывается единое поле вероятности обнаружения объекта для всех наблюдателей по всему району $P_{\text{обн}}(x, y)$ в зависимости от высоты установки наблюдателей, высоты объекта наблюдения и рельефа местности.

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим уравнение максимальной дальности обнаружения [5]

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{E_{\text{изл}} G A \delta_{\text{ц}}}{E_{\text{пр max}} (4\pi)^2}},$$

где $E_{\text{изл}}$ – излучаемая мощность; $E_{\text{пр max}}$ – мощность принимаемого наблюдателем сигнала; G – коэффициент направленного действия излучающей антенны; $\delta_{\text{ц}}$ – эффективная поверхность рассеяния объекта (ЭПР); A – эффективная площадь приемной антенны; R_{max} – максимальная дальность обнаружения, при которой для расстояния $R \leq R_{\text{max}}$ обнаружение цели обеспечивается с вероятностью правильного обнаружения ($P_{\text{обн}}$), не меньшей допустимой для заданных вероятностей ложной тревоги $P_{\text{лт}}$ и минимально допустимой вероятности обнаружения $P_{\text{обн min}}$. Данное определение в общем виде относится к однократному (мгновенному) наблюдению при установленных зависимостях между временем наблюдения T_0 , отношением сигнал/помеха ρ , $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{лт}}$.

Параметры $E_{\text{изл}}$, G , A относятся к наблюдателю и, следовательно, от R не зависят. Параметр $\delta_{\text{ц}}$ также не зависит от дальности до объекта R [1]. Энергия принимаемого сигнала, как и его мощность, обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до объекта [5]. Таким образом, мощность принимаемого наблюдателем сигнала можно представить как

$$E_{\text{пр}} = \beta / R^4, \quad (2)$$

где под β сведены все не зависящие от R параметры.



Критерием возможности обнаружения сигнала на фоне шумов различного происхождения является соотношение сигнал/помеха ρ , определяемое как [6]

$$\rho = 2 \int_{\tau} P_{\text{пр}} dt / P_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{пр}}$ – мощность полезного сигнала на входе приемного устройства наблюдателя, а $P_{\text{ш}}$ – спектральная плотность мощности шумов. Интегрирование проводится по времени посылки сигнала τ . То есть задача сводится к классическому энергетическому приемнику.

Таким образом, задача обнаружения является задачей проверки двух гипотез: H_0 (принимается только шум) и H_1 (принимается смесь сигнала и шума). Решение о наличии сигнала принимается по критерию Неймана – Пирсона, согласно которому оптимальная система обнаружения должна максимизировать вероятность правильного обнаружения $P_{\text{обн}}$ при фиксированной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, т. е. $P_{\text{обн}} \Rightarrow \max$ при $P_{\text{лт}} = \text{const}$ [1].

2. РАСЧЕТ ЕДИНОГО ПОЛЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

При обработке информации в активном режиме обнаружение осуществляется по результатам обработки излученного и принятого наблюдателем сигнала при наличии помех. Решение о наличии или отсутствии сигнала от объекта принимается периодически, после предварительной обработки (единичного импульса или пачки импульсов) поступившей на интервале наблюдения (накопления) длительностью T_0 реализации гауссовского случайного процесса $X(t)$ с нулевым математическим ожиданием. В отсутствие сигнала от объекта случайный процесс $X(t)$ имеет дисперсию $\sigma_{\text{ш}}^2$, при наличии сигнала от объекта – дисперсию $\sigma_{\text{с}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2$.

Известно [7], что плотность распределения статистики y для энергетического приемника (3), как распределение суммы квадратов нормальных случайных величин с нулевым средним и дисперсией σ^2 , описывается центральным χ^2 -распределением:

$$f(y) = \frac{1}{(2\sigma^2)^{n/2} \Gamma(n/2)} y^{n/2-1} e^{-y/2\sigma^2}, \quad y \geq 0,$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция; n – число степеней свободы, которое в случае цифрового анализа определяется числом N усредняемых выборочных оценок энергии $n = 2N$, а при аналоговой обработке $n = 2T_0 \Delta f$. Здесь T_0 – длительность излученного сигнала (импульса), Δf – полоса пропускания фильтра.

Числовые характеристики (два первых момента) χ^2 -распределения определяются следующими выражениями [8]:

$$m_{\chi} = n\sigma^2, \quad \sigma_{\chi}^2 = 2n\sigma^4.$$

Для гипотезы H_0 $m_0 = n\sigma_{\text{ш}}^2$, $\sigma_0^2 = 2n\sigma_{\text{ш}}^4$, а для гипотезы H_1 $m_1 = n(\sigma_{\text{ш}}^2 + \sigma_{\text{с}}^2)$, $\sigma_1^2 = 2n(\sigma_{\text{ш}}^2 + \sigma_{\text{с}}^2)^2$. Определим отношение сигнал/помеха как $\rho = \sigma_{\text{с}}^2 / \sigma_{\text{ш}}^2$, тогда

$$m_1 = n\sigma_{\text{ш}}^2(1+\rho), \quad \sigma_1^2 = 2n[\sigma_{\text{ш}}^2(1+\rho)]^2 = 2n\sigma_{\text{ш}}^4(1+\rho)^2. \quad (4)$$

При достаточно больших n χ^2 -распределение хорошо аппроксимируется нормальным распределением $N(m_{\chi}, \sigma_{\chi}^2)$.

На основании формул (2)–(4) можно построить зависимость $P_{\text{обн}}$ при фиксированной $P_{\text{лт}}$ от дальности до цели $R - P_{\text{обн}}(R)$ или зависимость $P_{\text{обн}}$ от ЭПР цели – $P_{\text{обн}}(\delta_{\text{ц}})$. Качественный характер этих зависимостей для двух фиксированных значений ЭПР $\delta_{\text{ц}}$ приведен на рис. 1, где $\delta_{\text{ц1}} > \delta_{\text{ц2}}$. Применительно к обзорным наблюдателям обычно считается, что надежное обнаружение обеспечивается при $\rho > 25$ [6].

Данная зависимость описывает этап первичной обработки. Для 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.

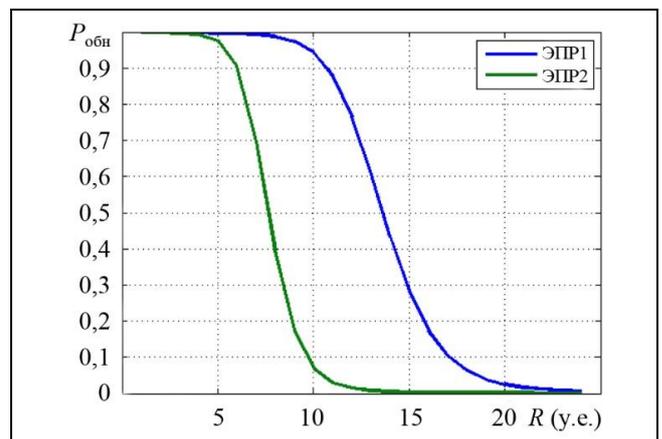


Рис. 1. Зависимость $P_{\text{обн}}$ от дальности до цели при фиксированной $P_{\text{лт}}$ для различных ЭПР

При решении задачи обнаружения необходимо учитывать влияние рельефа местности, т. е. $P_{\text{обн}}(R)$ является условной плотностью вероятности

$$\{P_{\text{обн}}(R) | P_{\text{зпв}}\}, \quad (5)$$

где $P_{\text{зпв}} = 1$ в зоне прямой видимости и $P_{\text{зпв}} = 0$ вне зоны прямой видимости (в зоне тени).

Как правило, приемная система наблюдателя работает периодически, каждый раз накапливая и обрабатывая сигнал в течение фиксированного времени T (времени разового наблюдения), за которое положение обнаруживаемого объекта и его скорость практически не изменяются. По истечении этого времени принимается решение об отсутствии или наличии объекта.

Учитывая, что каждый наблюдатель может работать со своим временем накопления, формулу вычисления интегральной вероятности (1) применить невозможно. Если бы удалось привести времена накопления (обзора) для всех наблюдателей к единому времени (базовому) $T_6 = \text{const}$, то можно было бы построить единую карту вероятности $P_{\text{обн}}(x, y)$ в координатах XOY для всех наблюдателей, находящихся в заданном районе.

В статье [4] показано, что для группы наблюдателей, имеющих различные времена разового наблюдения T_i , вероятности необнаружения за время T_i , $P_{\text{необн } i}(T_i)$, можно пересчитать в вероятности необнаружения за базовое время T_6 , $P_{\text{необн } i}(T_6)$, используя формулу

$$P_{\text{необн } i}(T_6) = [P_{\text{необн } i}(T_i)]^{T_6/T_i}. \quad (6)$$

Следовательно, вероятности необнаружения для двух наблюдателей с различными временами обзоров можно объединить, используя формулу (6), в вероятность необнаружения с единым временем (пересчитывается ко времени наблюдения одного из наблюдателей)

$$\begin{aligned} P_{\text{необн}\Sigma}(T_2) &= P_{\text{необн}2}(T_2)P_{\text{необн}1}(T_2) = \\ &= P_{\text{необн}2}(T_2)[P_{\text{необн}1}(T_1)]^{T_2/T_1}. \end{aligned}$$

Пусть наблюдатель, расположенный в районе, имеет координаты (x_l, y_l, H_l) , где H_l – высота установки наблюдателя. Тогда, используя зависимость $P_{\text{обн}}(R)$ для заданной высоты h , приведенную выше, можно, учитывая выражение (5), рассчитать вероятность необнаружения для всех точек района (x, y) , т. е. сформировать поле (матрицу) условных вероятностей необнаружения $P_{\text{необн}}(x, y | h)$.

Рассчитав по формуле (6) приведенные вероятности необнаружения для каждого наблюдателя, можно рассчитать единое (суммарное) поле для всех наблюдателей.

$$P_{\text{необн}}(x, y) = \prod_{l=1}^L P_{\text{необн } l}(x_l, y_l, H_l)^{T_M/T_l}, \quad (7)$$

где L – число наблюдателей; T_l – длительность обзора для l -го наблюдателя; $T_M = \max[T_l]$; (x_l, y_l) – координаты l -го наблюдателя; $P_{\text{необн } l}$ – вероятности необнаружения для l -го наблюдателя. Таким образом,

$$P_{\text{обн}}(x, y) = 1 - P_{\text{необн}}(x, y).$$

Кроме задания единого времени наблюдения для всех наблюдателей для расчета единого поля вероятности обнаружения, требуется выполнение еще одного очевидного условия – **равенства вероятности ложных тревог** для всех наблюдателей $P_{\text{лт}} = \alpha$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось с использованием пакета MATLAB.

На рис. 2 представлена карта, на которой проводилось моделирование (в правой части рисунков приведена цветовая шкала высот; здесь и далее

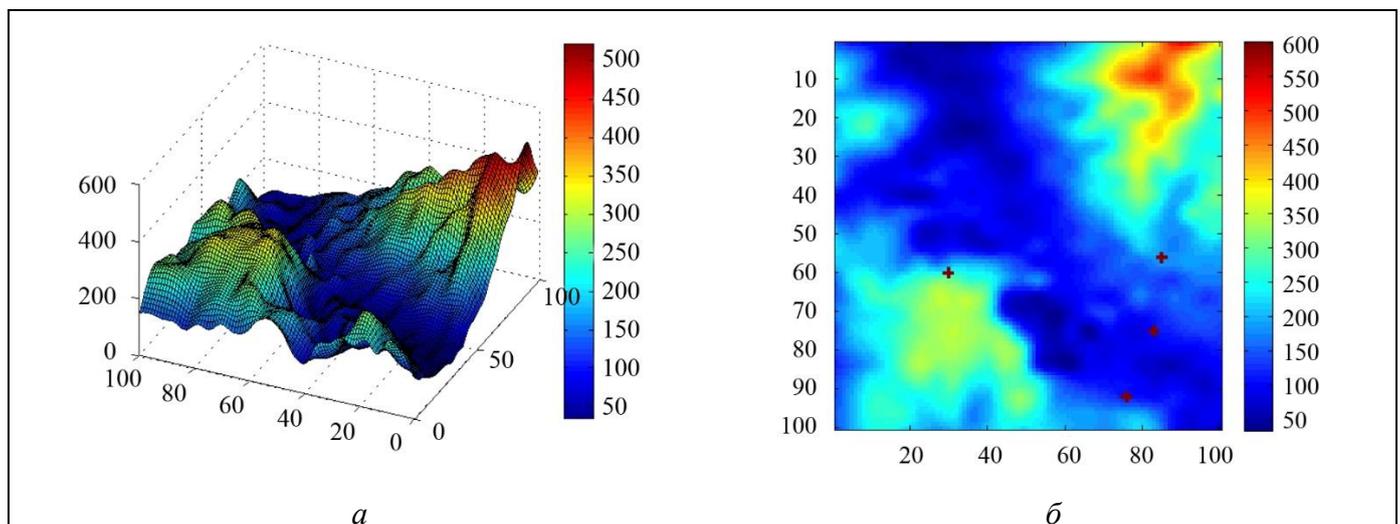


Рис. 2. Карта, на которой проводилось моделирование: a – проекция 3D, b – проекция 2D

шкалы высот и расстояний приведены в условных единицах (у.е.).

Рассматриваются два стационарных наблюдателя с координатами (x, y) и высотой установки H (соответствует высоте точки по карте + 5 у. е. над поверхностью земли):

– первый наблюдатель – $(x_1 = 30, y_1 = 60, H_1 = 263)$;

– второй наблюдатель может быть расположен в точках с тремя возможными координатами (на рис. 4, б отмечены значком «+») – $(x_2 = 85, y_2 = 56, H_2 = 193)$, $(x_2 = 83, y_2 = 75, H_2 = 104)$ и $(x_2 = 76, y_2 = 92, H_2 = 119)$.

Расстояние между первым и вторым наблюдателем во всех трех вариантах расстановки одинаково.

Рассматриваются два варианта высоты полета объекта – $h_1 = 600$ у. е. (высотный объект) и $h_2 = 200$ у. е. (ПМВ).

На рис. 3 (правая часть рисунков – цветовая

шкала вероятности обнаружения) приведен пример расчета суммарного поля вероятности обнаружения (ПВО) для двух наблюдателей при работе по высотному объекту (h_1).

Из рис. 3 видно, что оба наблюдателя имеют круговую диаграмму направленности, но так как первый наблюдатель установлен на склоне холма (см. рис. 2), то склон создает для него зону тени (см. нижнюю часть рис. 3, а). Поля вероятности обнаружения первого и второго наблюдателей не перекрываются, но учитывая, что $T_1 > T_2$, после пересчета к единому времени наблюдения по формуле (6) их единое ПВО практически образует сплошное поле вероятности обнаружения (рис. 3, з).

На рис. 4 приведен пример расчета суммарного ПВО для двух наблюдателей при работе с учетом рельефа местности (h_2). Правая часть рис. 4, а – цветовая шкала высот, правая часть рис. 4, б – цветовая шкала вероятности обнаружения.

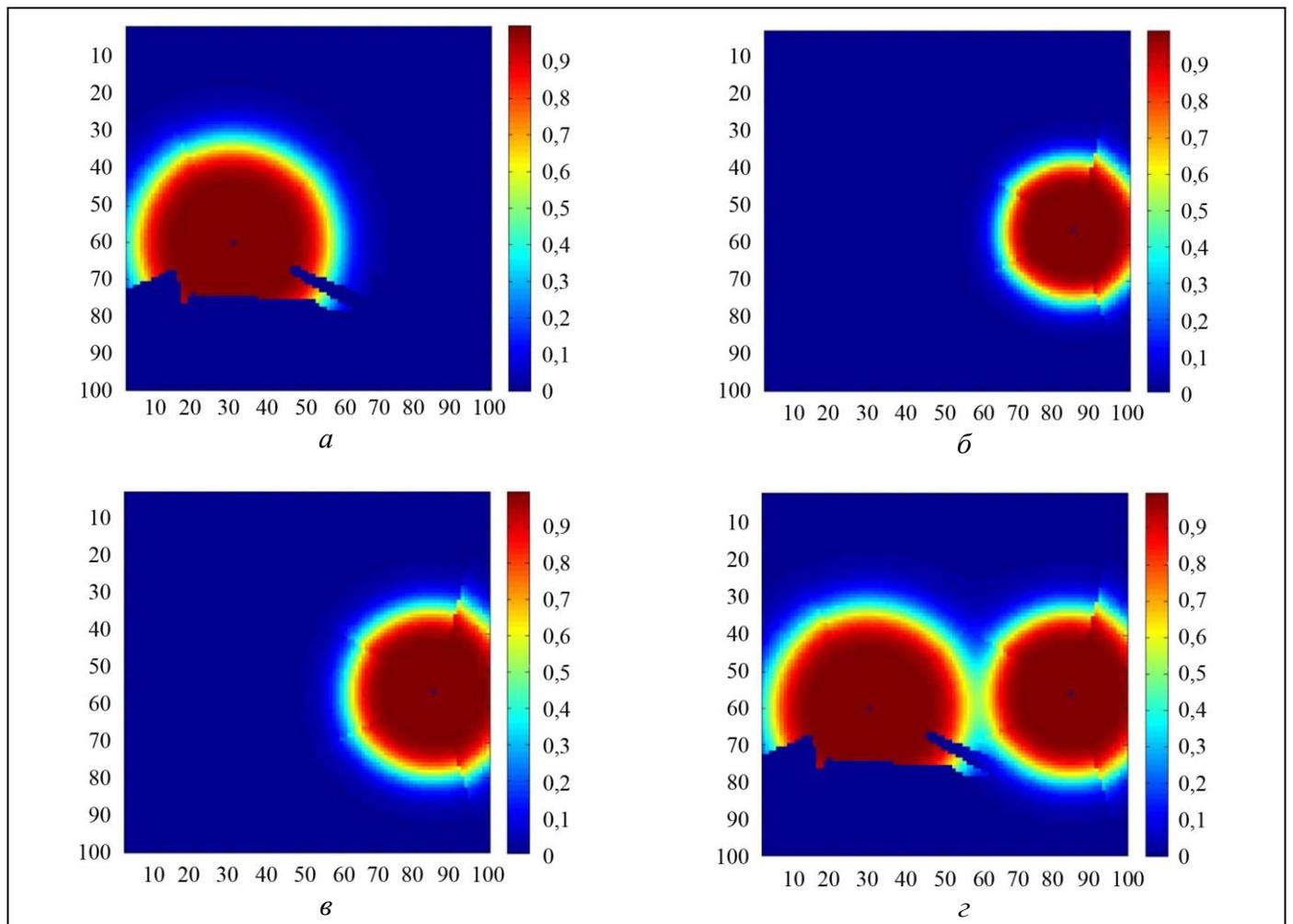


Рис. 3. Суммарное поле вероятности обнаружения для двух РЛС при работе по высотному объекту (h_1): а – ПВО для первого наблюдателя (время обзора – T_1) – $P_{обн1}$; б – ПВО для второго наблюдателя (время обзора – T_2) – $P_{обн2}$; в – ПВО для второго наблюдателя – $P_{обн3}$, пересчитанное по формуле (6) на время T_1 ; з – единое ПВО для двух наблюдателей – $P_{обн} = 1 - P_{исобн}$ по формуле (7)

На рис. 4, *a* приведено сечение географической карты по высоте движения объекта и показан рельеф, превышающий h_2 , который является районом, где объект не может появиться. Этот рельеф задает

«маску запрещенных к нахождению объекта областей», так как высота рельефа в них больше высоты движения объекта h . На картах ПВО отмечено зеленой заливкой.

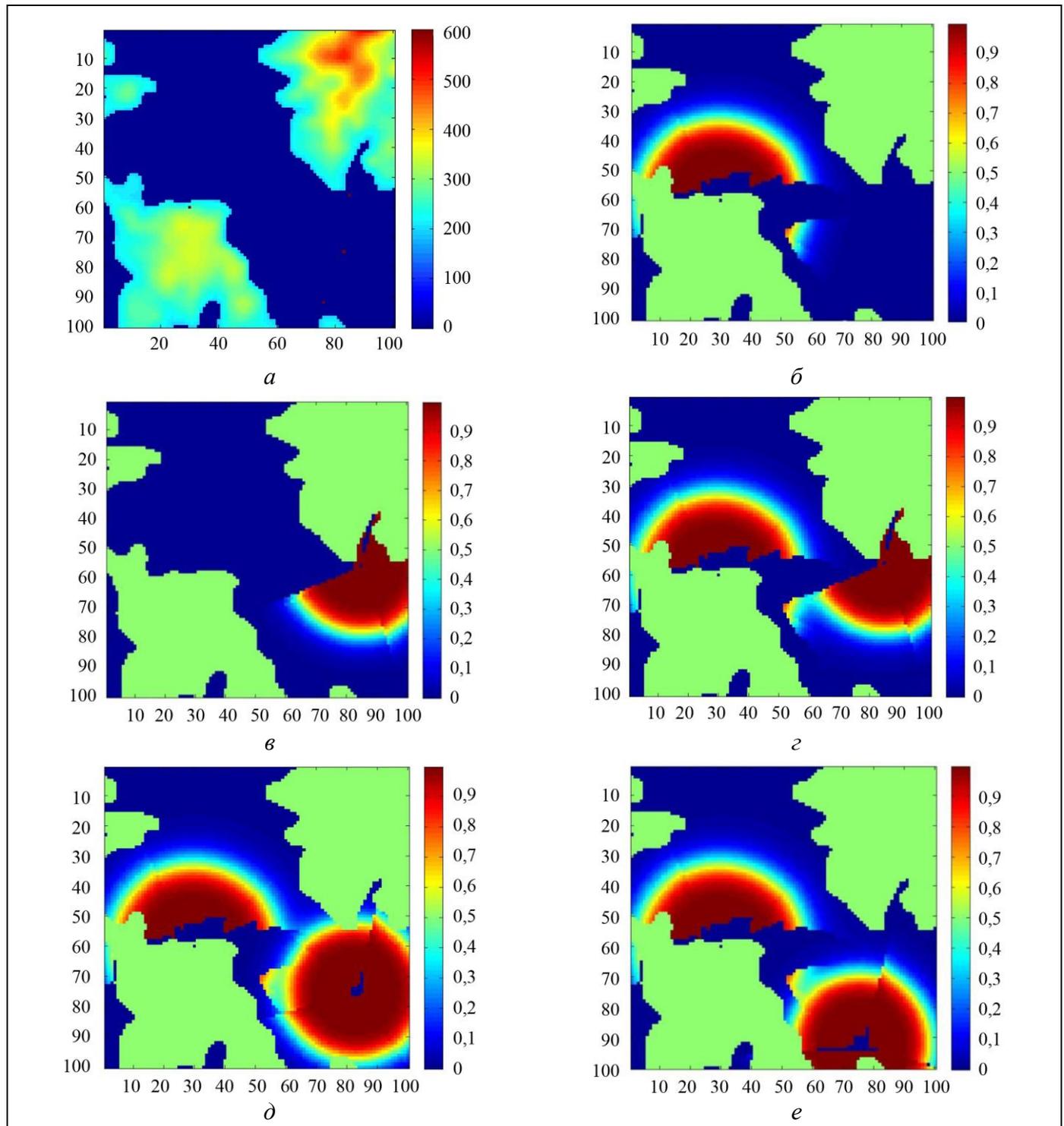


Рис. 4. Единое ПВО для двух наблюдателей при работе с учетом рельефа местности (h_2): *a* – сечение карты по высоте h_2 ; *б* – ПВО для первого наблюдателя (время обзора – T_1) – $P_{\text{обн}1}$; *в* – ПВО для второго наблюдателя – $P_{\text{обн}2}$, пересчитанное по формуле (4) на время T_1 ; *г* – единое ПВО для двух наблюдателей – $P_{\text{обн}} = 1 - P_{\text{необн}}$ по формуле (7), когда координаты второй РЛС – $(x_2 = 85, y_2 = 56, H_2 = 193)$; *д* – единое ПВО для двух наблюдателей – $P_{\text{обн}} = 1 - P_{\text{необн}}$ по формуле (7), когда координаты второго наблюдателя – $(x_2 = 83, y_2 = 75, H_2 = 104)$; *е* – единое ПВО для двух наблюдателей – $P_{\text{обн}} = 1 - P_{\text{необн}}$ по формуле (7), когда координаты второго наблюдателя – $(x_2 = 76, y_2 = 92, H_2 = 119)$

На рис 4, б хорошо видна зона тени, образованная склоном холма, на котором установлен первый наблюдатель. Появление тени объясняется тем, что $H_1 > h_2$ и склон холма образует угол закрытия, полностью перекрывающий в этом секторе зону обзора первого наблюдателя по высоте h_2 .

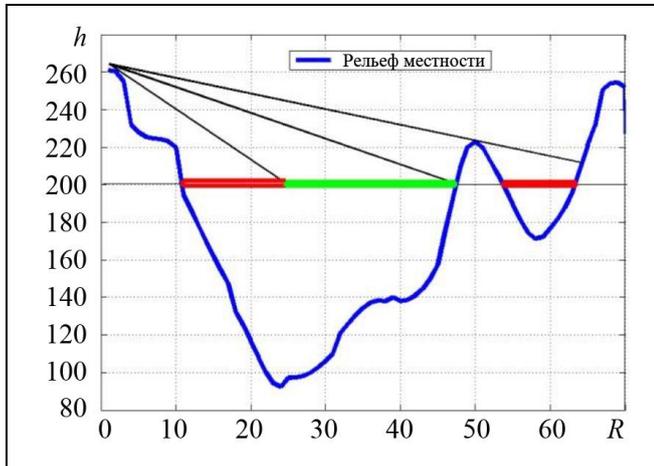


Рис. 5. Зоны видимости и тени

На рис. 5 приведен пример образования зон прямой видимости (зеленая окраска) и зон тени (красная окраска) по заданному направлению для координат карты ($x_1 = 30$, $y_1 = 60$, $H_1 = 266$) и ($x_2 = 100$, $y_2 = 40$) для $h = 200$.

Из сравнения рис. 4, а–е видно, что при обнаружении объекта с учетом рельефа взаимное расположение наблюдателей играет основную роль при формировании единого ПВО.

С учетом рельефа круговая диаграмма ПВО сильно деформируется и зависит уже от четырех параметров:

- расстояния между объектом и наблюдателем R ,
- высоты движения объекта h ,
- высоты установки антенны наблюдателя H ,
- направления на объект.

Тем не менее, для фиксированной высоты движения объекта h также можно рассчитать вероятность обнаружения для всех точек района $P_{\text{обн}}(x, y)$, т. е. построить карту вероятности обнаружения для $h = \text{const}$. Такой набор карт вероятности можно описывать трехмерной матрицей в координатах (x, y, h) для ряда фиксированных высот h_j ($1 \leq j \leq J$) при фиксированных координатах и высотах каждого наблюдателя H_l ($1 \leq l \leq L$) – получается так называемая многослойная карта.

Очевидно, что описанный выше расчет единого ПВО по формулам (5)–(7) легко обобщается на произвольное число наблюдателей.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ЕДИНОГО ПОЛЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ

Существует достаточно большой круг задач, для которых расчет единого ПВО нескольких наблюдателей представляет интерес. Эти задачи можно условно разделить на две группы.

Первая группа. При решении задачи обнаружения высотного объекта вычисление единого поля вероятности $P_{\text{обн}}(x, y)$ для всего района позволяет объединить информацию от отдельных наблюдателей, имеющих отличающиеся друг от друга технические характеристики (см. рис. 3). Карта при этом делается одномерной.

Вычисление единого поля вероятности $P_{\text{обн}}(x, y, h)$ для всего района позволяет наложить это поле на географическую карту. Тогда оператор может визуально (как известно, глаз человека очень хорошо справляется с такой задачей) определять слабые места, т. е. районы, в которых $P_{\text{обн}}$ мала, и, например, отправлять туда дополнительные средства или изменять расположение наблюдателей, чтобы прикрыть слабые места. Расчет единого ПВО в виде многослойной карты позволяет упростить решение задач оптимизации. Например, при решении задачи обнаружения объекта – упростить задачу оптимального размещения фиксированного числа РЛС в районе по заданному критерию. Такая задача к настоящему времени еще не рассматривалась.

Ко **второй группе** относятся задачи пересечения района, контролируемого несколькими стационарными наблюдателями, или уклонения от обнаружения этими наблюдателями. Данная задача относится к классу задач об управлении, получивших в литературе название задач управления подвижными объектами в конфликтной среде. Таким образом, задача сводится к построению маршрута, определяемого по вероятностному критерию. Построение маршрута на однослойной карте с препятствиями является хорошо изученной задачей как в теоретическом, так и в практическом плане. Для ее решения, как правило, используются классические алгоритмы поиска на графах, такие как, например, алгоритм Дейкстры. Они широко и успешно применяются при наличии одного слоя карты. При этом их сложно распространить на многослойные карты [9].

В случае использования вероятностного критерия выбор маршрута заключается в минимизации накопленной вероятности по формуле (1) для однослойной карты [10–12], но при этом не используется единое ПВО. В работе [13] рассмотрена за-

дача 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 (вычисление $P_{\text{обн}}$ для каждого наблюдателя проводится отдельно). В этих задачах предварительный расчет единого ПВО существенно облегчил бы динамическое программирование.

Знание многослойной карты единого ПВО района позволяет, например, при движении объекта с огибанием рельефа на заданной высоте легко свести многослойную карту к однослойной, на которой задача построения маршрута решается значительно проще. Кроме того, на однослойной карте оператор может визуально выбрать маршрут, как показано на рис. 6 (использована карта рис. 4, з).

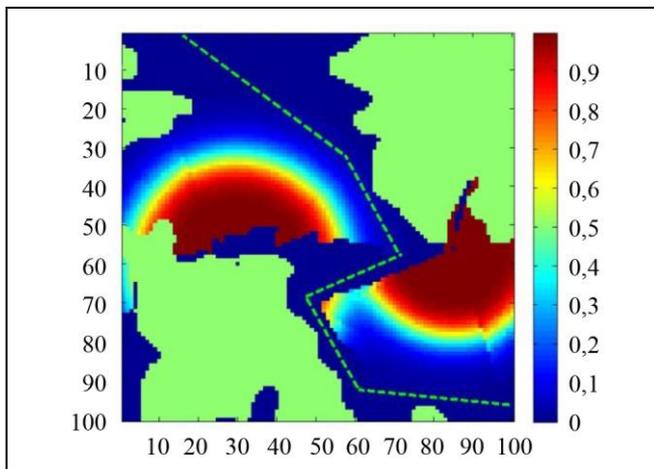


Рис. 6. Маршрут, построенный оператором

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие единого поля вероятности обнаружения для всех наблюдателей, контролирующих заданный район, предоставляет следующие возможности:

- может быть обобщено на случай обнаружения движущегося объекта с учетом рельефа местности, путем добавления еще двух координат: высоты расположения наблюдателя и высоты движения объекта;

- может быть использовано для визуализации, т. е. представления оператору;

- наличие единого поля вероятности для всего района, позволяет использовать его как основу для комплексирования вероятностей обнаружения от других источников информации. Например, от

наблюдателей, расположенных на движущихся объектах [14]. Пассивные локационные системы также могут использоваться для обнаружения и сопровождения движущихся объектов [14]. Кроме локационных методов обнаружения, в настоящее время исследуются нелокационные методы обнаружения подвижных объектов [15], к которым, в частности, относятся: тепловое обнаружение, радиочастотное сканирование, обнаружение с помощью оптических камер, обнаружение акустических сигналов, а также подходы, использующие классические методы машинного обучения с извлечением признаков в качестве предварительной обработки (искусственный интеллект). Включение ПВО от таких источников информации в единое поле вероятности обнаружения возможно при условии наличия моделей для расчетов вероятностей обнаружения объекта этими средствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационные системы / под ред. В.П. Бердышева. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 402 с. [*Radiolokatsionnyye sistemy / pod red Berdysheva V.P. Krasnoyarsk: Sib. Federal'nyy univer., 2011. – 402 s. (In Russian)*]
2. Мануйленко В.Г., Удин Е.Г. Теоретические основы крылатых управляемых ракет. – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 201 с. [*Manuylenko, V.G., Udin, E.G. Teoreticheskiye osnovy krylatykh upravlyayemykh raket. – SPb: Universitet ITMO, 2020. – 201 s. (In Russian)*]
3. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. – М.: Советское радио, 1977. – 336 с. [*Abchuk, V.A., Suzdal, V.G. Poisk ob'ektov. – Moscow: Sovetskoe radio, 1977. – 336 s. (In Russian)*]
4. Рудько И.М. Единое поле вероятностей обнаружения для разнородных средств наблюдения // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 53. – С. 93–101. [*Rudko, I.M. Unified Field of Detection Probabilities for Heterogeneous Means of Observations // Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. – 2020. – No. 53. – P. 93–101. (In Russian)*]
5. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с. [*Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii / pod red. Ya.D. Shirmana. – Moscow: Sovetskoye radio, 1970. – 560 s. (In Russian)*]
6. Залогин Н.Н., Калинин В.И., Скнарья А.В. Активная локация с использованием широкополосных хаотических сигналов // РЕНСИТ. – 2011. – Т. 3. – № 1. – С. 3–17. [*Zalogin, N.N., Kalinin, V.I., Sknarya, A.V. The Active Location with the Use of Ultrawide-Band Chaotic Signals // RENSIT. – 2011. – Vol. 3, no. 1. – P. 3–17. (In Russian)*]
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 2. – М.: Советское радио, 1968. – 504 с. [*Levin, B.R. Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering. Vol. 2. – Moscow: Sovetskoye radio, 1968. – 504 p. (In Russian)*]
8. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с. [*Cramer, H. Mathematical Methods of Statistics. – Princeton: Princeton University Press, 1946. – 589 p.*]



9. Моторин Д.Е., Попов С.Г. Алгоритм многокритериального поиска траекторий движения робота на многослойной карте // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 3. – С. 45–53. – DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.45 [Motorin, D.E., Popov, S.G. Multi-Criteria Path Planning Algorithm for a Robot on a Multilayer Map // Information and Control Systems. – 2018. – No. 3. – P. 45–53. – DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.45 (In Russian)]
10. Dogan, A. Probabilistic Path Planning for UAV // Proceedings of 2nd AIAA “Unmanned Unlimited” Conf. and Workshop & Exhibit. – San Diego, CA, USA, 2003. – P. 1–7.
11. Абрамянц Т.Г., Галяев А.А., Маслов Е.П. и др. Уклонение подвижного объекта в конфликтной среде от обнаружения системой разнородных наблюдателей // Проблемы управления. – 2015. – № 2. – С. 31–37. [Abramyants, T.G., Galyaev, A.A., Maslov, E.P. et al. Evasion of a Moving Object from Detection by a System of Heterogenous Observers in the Threat Environment // Automation and Remote Control. – 2017. – Vol. 72, no. 5. – P. 345–354.]
12. Добровидов А.В., Кулида Е.Л., Рудько И.М. Выбор траектории движения объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. – 2011. – № 3. – С. 64–75. [Dobrovodov, A.V., Kulida, E.L., Rudko, I.M. Control of Object Movement in Threat Environment // Control Sciences. – 2011. – № 3. – P. 64–75. (In Russian)]
13. 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. [Dobrovodov, A.V., Kulida, E.L., Rudko, I.M. Optimization of the Object Movement Path on the Probabilistic Criterion in the Mode of Passive Sonar in an Anisotropic Medium // Control Sciences. – 2014. – № 4. – P. 31–37. (In Russian)]
14. Khawaja, W., Ezuma, M., Semkin, V., et al. A Survey on Detection, Classification, and Tracking of UAVs Using Radar and Communications Systems // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2025. – Vol. 28. – P. 3272–3310. – DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2025.3554613>
15. Zitar, R.A., Al-Betar, M., Ryalat, M., Kassaymeh, S. A Review of UAV Visual Detection and Tracking Methods // Proc. 9th Annual Conf. on Computational Science & Computational Intelligence (CSCI'22). – Las Vegas, NV, USA, 2022. – Paper no. ffhah-04108638f.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
Б. В. Павловым.

Поступила в редакцию 30.06.2025,
после доработки 08.12.2025.
Принята к публикации 16.12.2025.

Рудько Игорь Михайлович – канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
✉ igor-rudko@mail.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6146-9177>

© 2025 г. И. М. Рудько



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

A UNIFIED DETECTION PROBABILITY FIELD FOR A GROUP OF STATIONARY OBSERVERS

I. M. Rudko

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

✉ igor-rudko@mail.ru

Abstract. This paper addresses the problem of calculating a unified detection probability field for a group of stationary observers monitoring a given area and operating in active mode. Stationary observers are located on a plane equipped with the Cartesian coordinate system, and their coordinates are known. For an object with given coordinates, a unified detection probability field is calculated for all stationary observers in the area. As shown, the greatest complexity arises for the objects necessitating the consideration of the terrain relief. For such objects, it is required to calculate a multilayer map with the altitude of the object’s movement, in contrast to a single-layer (flat) detection probability map, which is sufficient for detecting objects without taking the terrain relief into account. Examples are provided to demonstrate that the probability of object detection depends on the location and altitude of the observers, the altitude of the object’s movement, and the terrain relief. With a unified detection probability field calculated for a given area in the form of a multilayer map, it is much easier to optimize the location of observers (on the one hand) and control moving objects in a conflict environment (on the other).

Keywords: probability of object detection, detection probability field for an object, trajectory of an object, terrain relief.