

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ОТ МАЛОРАЗМЕРНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В.В. Ланцов, К.В. Ланцов, Л.А. Мартынова (Санкт-Петербург)

Введение. В настоящее время в связи с развитием морской робототехники все ее элементы требуют разработки так называемых цифровых двойников – имитационных моделей функционирования морских роботизированных систем [1]. В состав морской роботизированной системы, наряду с морской робототехникой, входят также и малоразмерные беспилотные летательные аппараты – беспилотные воздушные суда (БВС) (рис. 1), способные создать угрозу безопасности морским и прибрежным объектам. Угрозу может представлять выполняемая с помощью малоразмерных БВС фото и видеосъемка [2] или доставка полезной нагрузки [3].

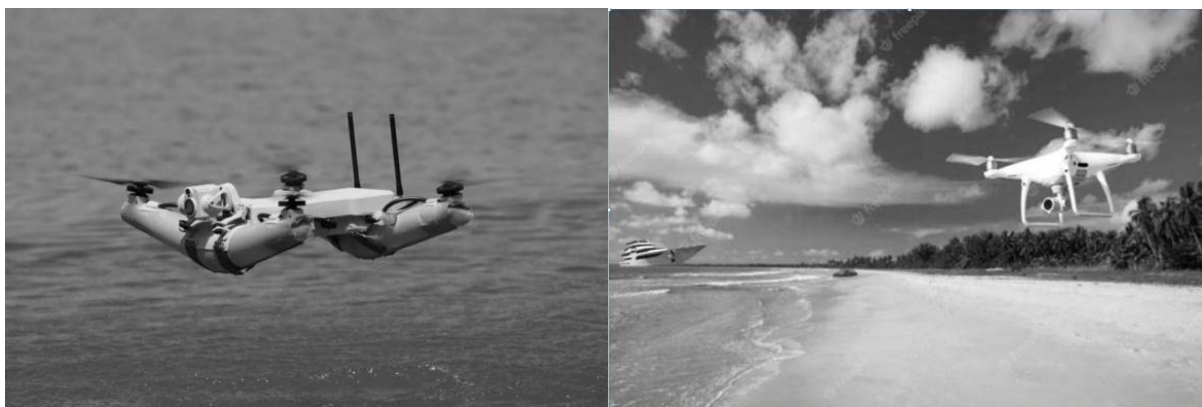


Рис. 1. Малоразмерные БВС над водной поверхностью [4]

В связи с этим при моделировании морской роботизированной системы необходимо дополнительное имитационное моделирование функционирования средств противодействия БВС путем своевременного их обнаружения и отведения с маршрутной траектории для защиты охраняемого подвижного морского объекта. Имитационное моделирование необходимо для определения мест размещения на берегу или в морской акватории средств обнаружения и отведения, определения их параметров, а также – для тестирования алгоритмов обнаружения и отведения БВС с маршрутной траектории [5]. Только решение перечисленных задач позволит сформировать эффективную систему защиты подвижного объекта от БВС из состава морской роботизированной системы. Этим определяется актуальность работы.

Средства обнаружения (СО) и средства отведения БВС в морской акватории могут быть размещены у береговой черты или на сверхмалых безэкипажных катерах вдоль маршрута движения охраняемого объекта. СО включают в свой состав следующие каналы обнаружения: радиолокационный (активный и пассивный), акустический, оптический, инфракрасный, лидарный, которые отличаются условиями применения и дальностью обнаружения.

В качестве показателя эффективности отведения малоразмерного БВС с маршрутной траектории примем вероятность отведения БВС от критической зоны, сформированной вокруг подвижного охраняемого объекта [6]. Вероятность

отведения БВС зависит, в свою очередь, от эффективности обнаружения БВС. В качестве показателя эффективности обнаружения БВС примем вероятность его обнаружения.

Поскольку в литературе, посвященной борьбе с БВС [7-19], отсутствуют публикации, связанные имитацией системы обнаружения и отведения БВС с маршрута движения, возникла необходимость разработки имитационной модели функционирования системы отведения БВС для оценки ее эффективности.

Целью работы явилась разработка имитационной модели оценки эффективности системы обнаружения и отведения БВС с маршрутной траектории.

Для разработки имитационной модели оценки эффективности системы обнаружения и отведения БВС с маршрутной траектории потребовалась разработка имитационных моделей:

- движения охраняемого объекта по заданному маршруту;
- работы средств обнаружения;
- работы средств отведения БВС, благодаря которым происходит отклонение БВС с заданного маршрута;
- движения БВС, которое направлено в прогнозируемую точку пересечения траектории БВС с траекторией движения охраняемого объекта;
- формирование расчетного блока оценки эффективности отведения БВС от критической области.

Постановка задачи. В глобальной системе координат **Оху** (рис. 2) пусть известны координаты (x_a, y_a) охраняемого объекта, движущегося курсом Q_a со скоростью V_a . Вокруг объекта сформирована критическая зона в виде круга радиуса R_{kz} , от которой необходимо отвести БВС. Известны координаты (x_{co}, y_{co}) положения средств обнаружения (СО) и их дальность обнаружения D_{co} . Дальность обнаружения зависит от погодных условий и каналов обнаружения. Включение каналов обнаружения происходит в зависимости от внешней обстановки (погодных условий, времени суток, времени года) и дальности до БВС.

Пусть система защиты от БВС построена в несколько эшелонов. При расположении СО в шахматном порядке при дальности D_{co} ширина полосы вокруг положения маршрута движения определяется выражениями:

$$D_{ob} = D_{co} + \sqrt{3} D_{co} \quad (1)$$

при размещении СО в два эшелона,

$$D_{ob} = 2 D_{co} + 2\sqrt{2} D_{co} \quad (2)$$

при размещении СО в три эшелона.

Средства обнаружения оснащены поворотной антенной с углом полураствора сектора обзора α ; вращение антенны происходит с угловой скоростью ω .

Полагаем, что средства обнаружения совмещены со средствами отведения, а дальность работы средств отведения совпадает с дальностью обнаружения.

Пусть в некоторый заранее неизвестный момент времени внезапно появилось БВС, которое движется с некоторой неизвестной скоростью V_b заранее неизвестным курсом Q_b . Предполагается, что движение БВС равномерно и прямолинейно.

Отведение БВС включается после того, как вероятность обнаружения превысит некоторое пороговое значение P_{obz} . После этого отведение заключается в определенном воздействии на его каналы навигации и управления, после чего в зависимости от алгоритмов системы управления БВС происходит его сход с маршрутной траектории (либо возвращение в исходную точку старта, либо посадка

на землю, либо в результате потери сигналов спутниковой навигации – перехода на навигацию по бортовой инерциальной навигационной системе и накопления ошибки позиционирования и т.д.).

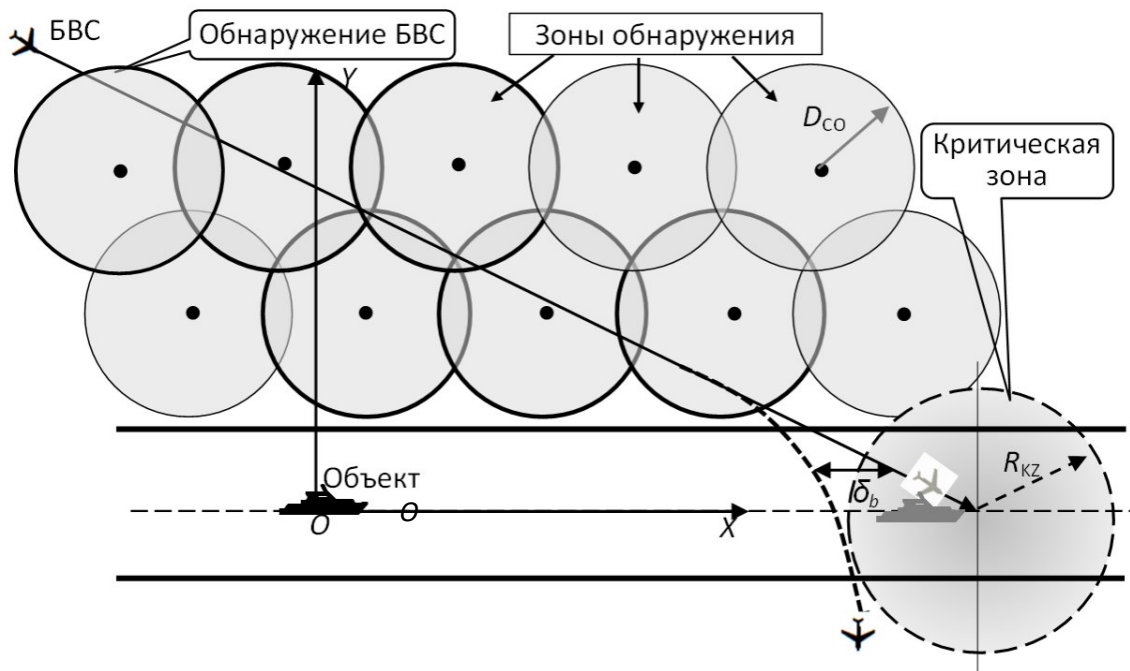


Рис. 2. Схема взаимного положения охраняемого объекта, зон обзора средств обнаружения, критической зоны и траектории полета БВС

Необходимо разработать имитационную модель функционирования системы обнаружения и отведения БВС с маршрутной траекторией для оценки эффективности его функционирования при различных вариантах применения каналов обнаружения в зависимости от различных внешних условий.

Имитация движения охраняемого объекта и БВС. Имитацию движения охраняемого объекта опишем уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} x_a(t) &= x_{a0} + V_{ax} \cdot t \cdot \sin Q_a; \\ y_a(t) &= y_{a0} + V_{ay} \cdot t \cdot \cos Q_a, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где Q_a – курс охраняемого объекта.

По аналогии имитация движения БВС описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} x_b(t) &= x_{b0} + V_{bx} \cdot t \cdot \sin Q_b; \\ y_b(t) &= y_{b0} + V_{by} \cdot t \cdot \cos Q_b, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где Q_b – курс БВС.

В имитационной модели БВС за направление его движения примем наихудший для охраняемого объекта вариант – движение БВС в упрежденную точку встречи с охраняемым объектом, которая определяется, исходя из координат БВС (x_b, y_b), известных скоростей V_a и V_b и координат объекта (x_a, y_a), а также текущего его курса Q_a . Исходя из этих данных – определяются курсовые углы q_a и q_b (рис. 3) при равномерном прямолинейном движении охраняемого объекта.

Курс БВС, направленный в упреждающую точку встречи с охраняемым объектом, определяется сближением БВС с охраняемым объектом в точке С, определяемой соотношением:

$$\frac{\sin q_a}{\sin q_b} = \frac{V_b}{V_a}, \quad (5)$$

где q_a и q_b – курсовые углы охраняемого объекта и БВС соответственно. Под курсовым углом будем понимать [20] угол между диаметральной плоскостью охраняемого объекта А (наблюдателя) и направлением «А (наблюдатель) – БВС (объект поиска)». Курсовые углы измеряются от 0 до 180° соответствующего борта наблюдателя и БВС.

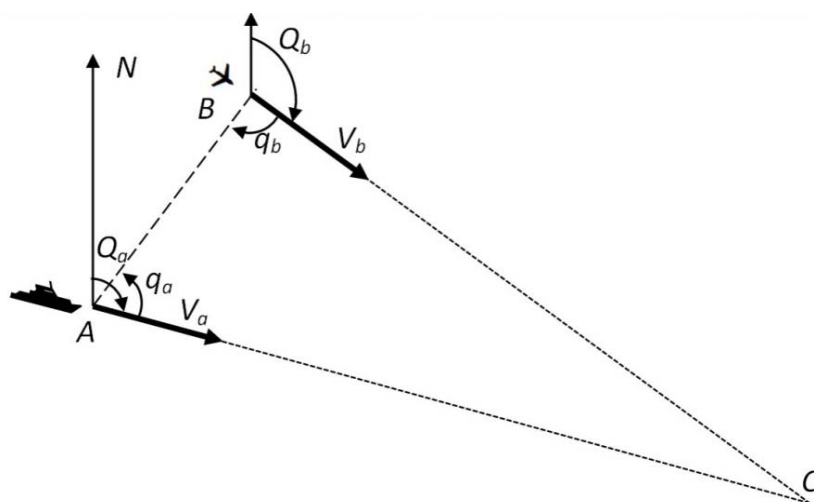


Рис. 3. Взаимное положение охраняемого объекта и БВС при расчете курса сближения БВС с охраняемым объектом

Из треугольника ABC относительный курс БВС (рис. 2) определяется выражением:

$$\theta = \arctg\left(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}\right). \quad (6)$$

Расчет относительной скорости БВС $V\rho$:

$$V\rho = -V_b \cdot \cos\theta \pm \sqrt{V_b^2 - V_a^2 + \sin^2\xi}. \quad (7)$$

Из треугольника скоростей по теореме косинусов получаем выражение:

$$V\rho = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 - 2V_a V_b \cos\xi}, \quad (8)$$

из которого находим ξ .

Поскольку угол ξ представляет собой разность курсов Q_a и Q_b , то курс Q_b движения БВС в точку встречи с охраняемым объектом определяется выражением:

$$Q_b = Q_a + \xi. \quad (9)$$

При движении БВС по направлению к охраняемому объекту происходит последовательное пересечение БВС зон оборота (ЗО) СО в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_{M_0} , где M_0 – количество пересекаемых зон.

Полагаем, что БВС обнаружено СО, если:

– в ходе движения БВС попало в пределы зоны обзора i -го средства обнаружения:

$$(X_b - X_{CO_i})^2 + (Y_b - Y_{CO_i})^2 < D_{CO_i}^2; \quad (10)$$

– положение сектора обзора антенны ориентировано в направлении на БВС;
– вероятность обнаружения БВС определяется внешними условиями и используемым каналом обнаружения:

$$P_{ob} = 1 - (1 - P_0)^M; \quad (11)$$

– вероятность обнаружения не ниже заданного уровня вероятности обнаружения

$$P_{ob} \geq P_{obz}. \quad (12)$$

Изменение положения сектора обзора, характеризуемого углом Q_k , имеет вид:

$$Q_k = Q_{k-1} + \omega \Delta t,$$

где Δt – некоторый промежуток времени, равный, например, такту имитации.

Для формирования условия попадания БВС в сектор обзора поворотной антенны перейдем в систему координат, связанную с антенной. Координаты положения БВС (x_k^* , y_k^*) в системе координат, связанной с антенной, определяются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} x_k^* &= x_{bk} \cos Q_k - y_{bk} \sin Q_k + x_{CO_i}; \\ y_k^* &= x_{bk} \sin Q_k + y_{bk} \cos Q_k + y_{CO_i}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где Q_k – направление поворотной антенны.

x_{bk}, y_{bk} – координаты БВС в глобальной системе координат в k -й момент времени.

Попадание точки (x_k^* , y_k^*) в сектор обзора поворотной антенны определяется одновременным выполнением условий:

$$\left. \begin{aligned} (x_k^* - x_{CO_i})^2 + (y_k^* - y_{CO_i})^2 &< D_{CO_i}^2 \\ \left| \frac{x_k^*}{y_k^*} \right| &< \operatorname{tg} \alpha \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Если точка (x_k^* , y_k^*) попадает в пределы сектора обзора, то полагаем, что произошло обнаружение БВС данным СО.

После того, как обнаружили БВС в точке с координатами (x_k , y_k), моделируем включение средств отведения; предполагается, что они имеют круговую зону воздействия.

Вероятность отведения БВС от критической зоны рассчитывается, исходя из количества M_{ob} пройденных зон вокруг средств отведения:

$$P_{отв} = 1 - (1 - P_{ob})^{M_{ob}}. \quad (15)$$

Попадание БВС в критическую зону характеризуется условием:

$$(X_b - X_{zo_i})^2 + (Y_b - Y_{zo_i})^2 < R_{zo_i}^2. \quad (16)$$

Определение положения средств обнаружения. Размер критической зоны по результатам исследований, приведенных в [2], принят равным 100 м. Именно в этих пределах приближение БВС к охраняемому объекту опасно,

прежде всего из-за возможного ведения видео- и фотосъемки, а также из-за возможной доставки полезной нагрузки.

Для отведения БВС с маршрутной траектории требуется время t_b , за которое БВС, двигаясь со скоростью V_b , преодолеет расстояние:

$$S_b = V_b \cdot R_{KZ} / \delta_b, \quad (17)$$

где δ_b – смещение БВС с маршрутной траектории за единицу времени.

Поскольку охраняемый объект – подвижный, то критическая зона представляет собой полосу шириной $2S_b$, центральной линией полосы является маршрут движения охраняемого объекта. Поскольку дальность обнаружения существующих средств обнаружения в разы меньше требуемой S_b , то для эффективной работы системы защиты предложено размещение средств обнаружения в несколько эшелонов на удалении от охраняемого объекта так, чтобы $D_{ob} = S_b$. Исходя из размера критической зоны формируется размещение СО, обеспечивающие требуемую дальность обнаружения БВС.

Расчет вероятности обнаружения и вероятности отведения БВС от критической зоны

Из-за наличия случайных факторов, которые заранее неизвестны (положение, курс и скорость БВС, внешние условия, оказывающие влияние на дальность обнаружения БВС и дальность отведения БВС, степень отведения, зависящая от алгоритмов системы управления БВС), используем метод статистических испытаний для расчета вероятности обнаружения и вероятности отведения БВС от критической зоны.

При его использовании разыгрываются случайные числа, по которым затем задаются случайные параметры. Чтобы исключить предвзятость в выборе случайных чисел и зависимость результата от выбранного числа, воспользуемся методом статистических испытаний (методом Монте–Карло), для чего проводим серию испытаний и по результатам серии испытаний определим вероятность обнаружения БВС и вероятность отведения БВС от критической зоны.

Вероятность определим отношением результативных испытаний N_0 к общему количеству N проведенных испытаний:

$$P_{BM} = \frac{N_0}{N}. \quad (17)$$

Количество испытаний, необходимое для обеспечения заданной точности по вероятности p обнаружения БВС, определяется выражением:

$$N = t_\alpha^2 \frac{p(1-p)}{\varepsilon^2}, \quad (18)$$

где t_α – достоверность;

ε – точность оценки.

Для определения результативности испытаний в каждом испытании задаются исходные данные:

- маршрут следования охраняемого объекта;
- внешние условия – благоприятные, дождь, туман;
- момент времени, координаты начального положения и скорость БВС;
- скорость охраняемого объекта V_a ;
- вероятность обнаружения БВС при нахождении его в зоне обзора принимается равной P_0 .

В начальный момент времени начинается движение охраняемого объекта.

В некоторый случайный момент времени возникает БВС, начальное положение которого и его скорость разыгрываются равномерно. Происходит определение направления движения БВС в точку потенциальной встречи с движущимся охраняемым объектом.

В каждом такте имитации происходит:

- расчет текущих координат охраняемого объекта;
- формирование вокруг охраняемого объекта подвижной критической зоны радиуса R_{kz} , в которую не должен попасть БВС;
- определение текущего положения охраняемого объекта;
- определение текущего положения БВС.

Обнаружение БВС средствами обнаружения (СО) происходит с заданной вероятностью P_0 . В ходе движения БВС оценивается попадание БВС в зоны обнаружения СО по результатам выполнения условия (12). После обнаружения БВС включаются средства отведения с маршрутной траектории. При дальнейшем движении происходит изменение направления движения БВС из-за действия средств отведения БВС с маршрутной траектории.

Моделирование движения БВС и движения охраняемого объекта продолжается до тех пор, пока БВС не окажется в критической зоне или не пересечет трассу движения охраняемого объекта. Если БВС попало в пределы критической зоны, то испытание считается нерезультативным, в противном случае испытание считается результативным.

При определенном сочетании скоростей БВС может никогда не оказаться в критической зоне:

- если БВС настолько медленное, что не успевает даже по траверзу приблизиться к траектории движения охраняемого объекта;
- если курсы движения охраняемого объекта и БВС параллельны, но эта ситуация не может возникнуть из-за особенностей рассматриваемой задачи: БВС стремится к охраняемому объекту;
- курс БВС, при котором оно будет практически параллельно долго и/или медленно следовать к точке встречи с охраняемым объектом; в этом случае у БВС может не хватить энергоресурса для прибытия в точку встречи.

Адекватность моделирования функционирования средств обнаружения и влияния на дальность обнаружения параметров внешней среды, имитация движения БВС – подтверждены результатами натурных экспериментов.

Результаты численного эксперимента. Целью проведения численного эксперимента являлось определение зависимости вероятности отведения БВС от критической зоны при различных скоростях движения БВС из заданного диапазона и вероятности обнаружения БВС одиночным СО P_0 .

Скорость охраняемого объекта V_a , например, моторной яхты, принималась равной 52,5 км/ч.

Отклонение от маршрута при включении средств отведения принималось равным: $0,5^\circ + \text{Rand}[0;1]$.

Скорость БВС V_b перебиралась из диапазона [52,5; 82,5] км с шагом 3,75 км, всего 9 вариантов.

При проведении исследований рассмотрены варианты, отличающиеся внешними условиями. Предполагалось, что изменение внешних условий оказывает влияние на вероятность обнаружения отдельно взятым СО. В ходе проведения эксперимента рассмотрено 5 вариантов изменения вероятности от 1,00 до 0,60 с шагом 0,1, всего 5

вариантов. Для каждого варианта получена вероятность отведения БВС от критической зоны в зависимости от скорости движения БВС.

В ходе проведения численного эксперимента разыгрывался момент времени появления БВМ и положение БВС.

Результаты исследований приведены на рис. 4. По горизонтальной оси отложена скорость движения БВС, каждая кривая соответствует вероятности обнаружения БВС одиночным СО.

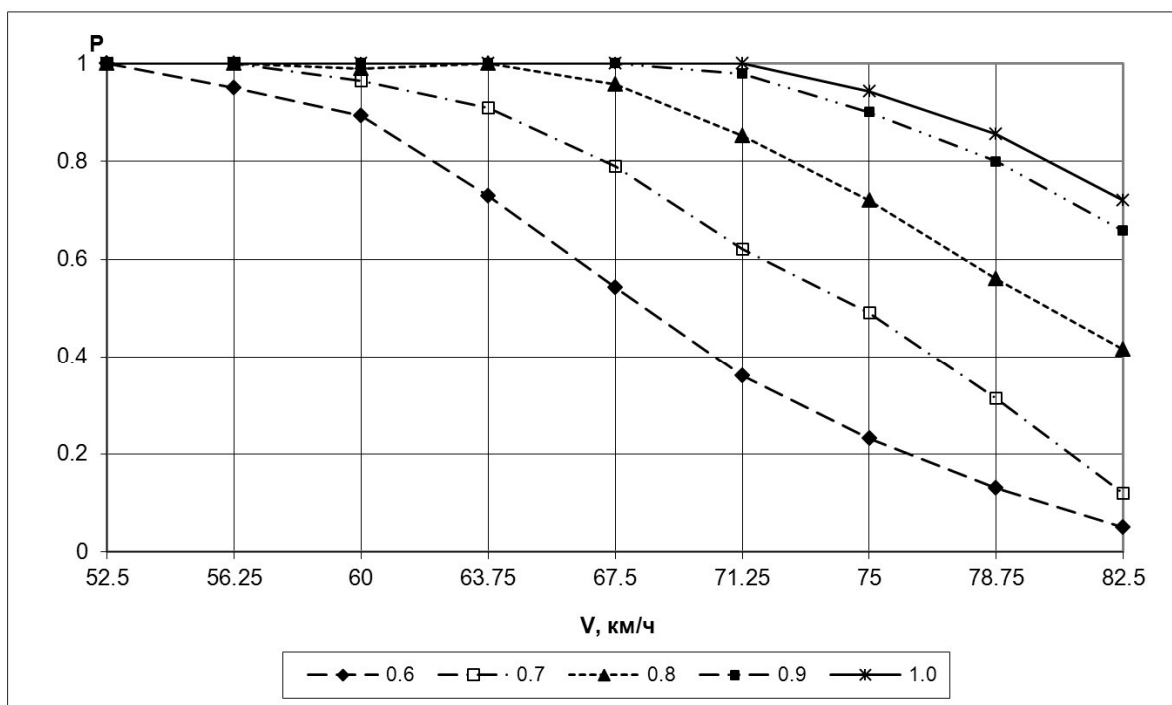


Рис. 4. Вероятности отведения БВС от критической зоны в зависимости от скорости его движения и вероятности обнаружения БВС

Из рис. 4 видно, что:

– с увеличением скорости движения БВС траектория приближается постепенно к траверзной, БВС быстрее достигает траектории движения объекта и все чаще успевает попасть в критическую зону, несмотря на отклонение из-за включения средств отведения;

– с увеличением вероятности обнаружения одиночным СО БВС от 0,6 до 1,00 вероятность отведения БВС от критической зоны повышается на 0,2 при средних скоростях движения БВС и на 0,6 при высоких скоростях движения БВС.

Результаты имитации показали, что если БВС движется по траверзу к траектории движения охраняемого объекта, а это наиболее логичный вариант, то время от обнаружения до встречи мало, и отклонение БВС от маршрута на требуемую величину может и не произойти. Если же предположить, что охраняемый объект движется с высокой скоростью, то БВС ничего не остается, как двигаться практически параллельными курсами, в результате чего обнаружение произойдет задолго до момента встречи, и есть шанс отклонить БВС.

Это означает в качестве рекомендаций, что целесообразно охраняемому объекту двигаться с высокой скоростью. Понятно, что это не всегда возможно, например, из-за плохой видимости, волнения и т.д.

Заключение

Разработана имитационная модель оценки эффективности отведения БВС с маршрутной траектории так, чтобы оно не попало в пределы критической зоны.

В ходе имитации воспроизводились движение охраняемого объекта, движение БВС, вращение антенны средств обнаружения, погодные условия. По результатам эксперимента оценивалась вероятность обнаружения БВС и вероятность его отведения от критической зоны путем его схода с маршрутной траектории.

Проведены численные эксперименты, направленные на оценку влияния скорости БВС и вероятности обнаружения одиночным средством обнаружения, зависящей от внешних условий, на эффективность отведения БВС с маршрутной траектории.

Имитационная модель реализована в среде Microsoft Studio на языке C++.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 23-29-00803.

Литература

1. **Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.** Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Имитационное моделирование. Теория и практика. Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474–479.
2. **Martynova L.A., Koryakin A.V., Lantsov K.V., Lantsov V.V.** Determination of coordinates and parameters of a moving object by image processing // Computer Optics. 2012. Vol. 36. № 2. P. 266–273.
3. Беспилотник атаковал штаб Черноморского флота в Севастополе. URL: <https://ria.ru/20220731/bpla-1806166846.html> (дата обращения 30.04.2023).
4. Новая концепция морского БПЛА позволяет запускать дрон с воды и с подводной лодки (видео). URL: [https://naukatehnika.com/novaya-konczepczija-morskogo-bpla-prozvolyaet-zapuskat-dron-s-vodyi-i-s-podvodnoj-lodki-\(video\).html](https://naukatehnika.com/novaya-konczepczija-morskogo-bpla-prozvolyaet-zapuskat-dron-s-vodyi-i-s-podvodnoj-lodki-(video).html) (дата обращения 01.05.2023).
5. **Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 3 (110). С. 109–121.
6. **Мартынова Л.А., Машошин А.И.** Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нештатных ситуациях // Экстремальная робототехника. 2016. Т. 1. № 1. С. 86–91.
7. **Афонин И.Е., Макаренко С.И., Петров С.В., Привалов А.А.** Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитных ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, Ливии и Нагорном Карабахе // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 163–191.
8. **Шпигарь Н., Олейник А., Спичак Е.** Обнаружение и подавление БПЛА // Арсенал Отечества. 2021. № 1 (51). С. 18–23.
9. **Макаренко С.И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.
10. **Макаренко С.И., Тимошенко А.В.** Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147–197.

11. **Ростопчин В.В.** Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udamnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.01.2022).
12. **Скиба В.А., Кузьмин А.А.** Анализ методов и средств противодействия беспилотным летательным аппаратам в интересах Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. 2021. № 11. С. 104–114.
13. **Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И.** Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2014. № 6 (14). URL: <http://arsenalotechestva.ru/new/389-antidrone> (дата доступа 20.01.2022).
14. **Тимохин А.** Решение проблемы «насыщающих» атак ПВО // Военное обозрение. 2019. URL: <https://topwar.ru/157073-reshenie-problemy-nasyschajuschih-atak-pvo-onoest-i-nadnim-rabotajut.html> (дата доступа 20.01.2022).
15. **Веремеенко С.** Обнуление цифровой электроники // Арсенал Отечества. 2021. № 1 (51). С. 38–40.
16. **Лопаткин Д.В., Савченко А.Ю., Солоха Н.Г.** К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2014. № 2. С. 41–47.
17. Российские противоркетные мины и зарубежная реакция // Военное обозрение. URL: <https://topwar.ru/188195-rossijskie-protivovertoletnie-miny-i-zarubezhnaja-reakcija.html> (дата доступа 20.01.2022).
18. **Колибернов Е.С., Корнев В.И., Сосков А.А.** Справочник офицера инженерных войск / под ред. С.Х. Аганова. М.: Воениздат, 1989. – 432 с.
19. **Митрофанов Д.Г., Шишков С.В.** Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 28–40.
20. **Абчук В., Суздаль В.** Поиск объектов, М.: Сов. радио. 1977, 334с.