

В.В. Ланцов, К.В. Ланцов, А.В. Корякин, Л.А. Мартынова

**МЕТОД И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА
ОТ МАЛОРАЗМЕРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ***

Целью исследования является оценка эффективности системы защиты подвижного охраняемого объекта от малоразмерного беспилотного воздушного судна (БВС). В связи с особенностью построения системы защиты подвижного объекта, связанной с перемещением синхронно с объектом критической зоны, в которую не должен попасть БВС, потребовалась разработка метода и математической модели оценки эффективности БВС. В качестве показателя эффективности принята вероятность отведения БВС от критической зоны. Проанализировано, что отведение БВС от критической зоны осуществляется за счет своевременного обнаружения БВС и его перехода от навигации по сигналам спутниковых навигационных систем – к навигации по бортовой инерциальной навигационной системе. Своевременность обнаружения определяется дальностью обнаружения БВС. Дальность обнаружения определяется, прежде всего, параметрами самих средств обнаружения, топологией их размещения, размерами критической зоны вокруг охраняемого объекта, направлением движения БВС. Размер критической зоны определяется опасностью видеосъемки с борта БВС или сброса полезной нагрузки. Наиболее уязвимым для охраняемого объекта направлением движения БВС является движение к точке встречи с охраняемым объектом. Результаты анализа и разработанные алгоритмы функционирования системы защиты от малоразмерного БВС учтены при разработке математической модели оценки эффективности защиты охраняемого объекта. Ввиду того, что часть параметров БВС заранее неизвестна, их значения разыгрывались равномерно. Для расчета показателя эффективности использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). В каждом испытании разыгрывались случайные параметры БВС, задавались исходные данные, воспроизводились процессы движения охраняемого объекта и БВС, изменения положения критической зоны, оценивалось попадание БВС в зоны обзора средств обнаружения, отведение от генерального курса БВС и попадание его в пределы критической зоны. Разработанный метод и математическая модель оценки эффективности позволили провести численный эксперимент, направленный на оценку влияния скорости БВС на эффективность защиты подвижного охраняемого объекта. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и разработке системы защиты охраняемого объекта от БВС, при сравнительном анализе альтернативных систем защиты от БВС. Предложенные метод и математическая модель могут быть использованы также и в подводной морской среде при оценке эффективности защиты охраняемого обитаемого/необитаемого объекта от морских робототехнических комплексов.

Беспилотное воздушное судно; защита подвижного объекта; оценка эффективности; средства обнаружения; вероятность обнаружения; метод статистических испытаний.

V.V. Lantsov, K.V. Lantsov, A.V. Koryakin, L.A. Martynova

**THE METHOD AND MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATING
THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM FOR PROTECTING A MOVING
OBJECT FROM A SMALL-SIZED ROBOTIC COMPLEX**

The purpose of the study is to evaluate the effectiveness of the system for protecting a mobile protected object from a small unmanned aerial vehicle (UAV). In connection with the peculiarity of the construction of the protection system for a mobile object, associated with the movement synchronously with the object of the critical zone, into which the UAV should not fall, it was necessary to develop a method and a mathematical model for assessing the effectiveness of the UAV.

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

As an indicator of efficiency, the probability of diverting the UAV from the critical zone was taken. It is analyzed that the removal of the UAV from the critical zone is carried out due to the timely detection of the UAV and its transition from navigation using the signals of satellite navigation systems to the onboard inertial navigation system. The timeliness of detection is determined by the detection range of the UA. The detection range is determined, first of all, by the parameters of the detection means themselves, the topology of their placement, the size of the critical zone around the protected object, and the direction of movement of the UAV. The size of the critical zone is determined by the danger of video filming from the UAV or payload drop. The direction of movement of the UAV most vulnerable to the protected object is the movement to the meeting point with the protected object. The results of the analysis and the developed algorithms for the functioning of the protection system against a small UAV were taken into account when developing a mathematical model for assessing the effectiveness of protecting a protected object. Due to the fact that some of the parameters of the BVS are not known in advance, their values were played with equiprobability. The method of statistical tests (Monte Carlo method) was used to calculate the efficiency indicator. In each test, random parameters of the UAV were played out, initial data were set, the processes of movement of the protected object and the UAV, changes in the position of the critical zone were reproduced, the UAV hitting the viewing areas of the detection tools, moving away from the general course of the UAV and getting into the limits of the critical zone were evaluated. The developed method and mathematical model for evaluating the effectiveness made it possible to conduct a numerical experiment aimed at assessing the influence of the UAV speed on the protection efficiency of a mobile guarded object. The results of the work can be used in the design and development of a system for protecting a protected object from UA, in a comparative analysis of alternative systems for protecting against UA. The proposed method and mathematical model can also be used in the underwater marine environment when evaluating the effectiveness of protecting a protected inhabited / uninhabited object from marine robotic systems.

Unmanned aerial vehicle; multipath and multipath; dense urban development; difference-range method; location determination.

Введение. В настоящее время широко разрабатываются системы защиты различных объектов от беспилотных воздушных судов (БВС) [1], и для сравнения вариантов систем защиты и понимания, насколько эффективно построенная система обеспечивает защиту, а также для оценки влияния внешней среды на результат защиты, необходимо иметь оценку эффективности разрабатываемых и уже разработанных систем защиты от малоразмерных БВС [2–6].

Особенность системы защиты подвижных объектов по сравнению с защитой стационарных объектов заключается в зависимости эффективности защиты не только от средств обнаружения, движения БВС и внешней среды, но и от движения самого подвижного объекта. Из-за этого защите подлежит протяженная территория, сопредельная с маршрутом следования подвижного объекта, в связи с чем необходимо либо по всей территории разместить средства обнаружения, что экономически затратно, либо средства обнаружения должны синхронно перемещаться вместе с подвижным объектом, что не всегда технически возможно и сложно реализуемо. Из-за протяженного маршрута возможна изменчивость внешней обстановки по мере перемещения объекта: это может быть открытая местность, переходящая в пересеченную и горную, в городские условия с плотной застройкой или малоэтажными домами. От условий положения подвижного объекта существенно зависит дальность обнаружения и погрешность определения координат БВС.

В связи с этим актуальным является задача разработки метода оценки эффективности системы защиты подвижного охраняемого объекта от БВС.

Имеющиеся публикации посвящены в основном средствам обнаружения БВС [7–9] однако публикации по оценке эффективности систем защиты подвижного охраняемого объекта от малоразмерных БВС в литературе практически отсутствуют.

Целью работы явилась разработка метода оценки эффективности подвижного объекта от БВС.

Постановка задачи. В глобальной системе координат Oxy (рис.1) рассмотрим следующий тактический эпизод. Пусть имеется охраняемый объект, движущийся курсом Q_a и скоростью V_a . Пусть вокруг объекта сформирована критическая зона в виде круга радиуса R_{KZ} , от которой необходимо отвести БВС. По мере перемещения подвижного объекта критическая зона также синхронно перемещается. Для исключения попадания БВС в критическую зону на охраняемом объекте и вдоль траектории его движения размещены средства обнаружения (СО), характеризующиеся дальностью обнаружения D_{CO} и координатами своего положения x_{CO}, y_{CO} .

Пусть по направлению к охраняемому объекту движется БВС со скоростью V_b и курсом Q_b , которые заранее неизвестны. Пусть навигация БВС осуществляется по сигналам спутниковых навигационных систем. По мере приближения БВС к охраняемому объекту на дистанцию D_{ob} БВС обнаруживается средствами обнаружения и через время принятия решения о включении противодействия происходит подавление сигналов спутниковых навигационных систем [1, с.81]. БВС вынужденно [1, с.31] переходит на навигацию по бортовой инерциальной навигационной системе (БИНС). Навигация по БИНС характеризуется постепенным накоплением погрешности δ_b определения навигационных параметров: пусть известно СКО σ отклонения БВС от первоначальной траектории при работе БИНС [10]. В связи с этим по мере полета БВС к охраняемому объекту происходит постепенное его отклонение от направления на охраняемый объект, в результате чего БВС может оказаться в стороне от него на расстоянии δ_b .

Для обеспечения отведения БВС от критической зоны необходимо, чтобы погрешность δ_b превышала радиус критической зоны R_{KZ} , то есть выполнялось условие $\delta_b > R_{KZ}$.

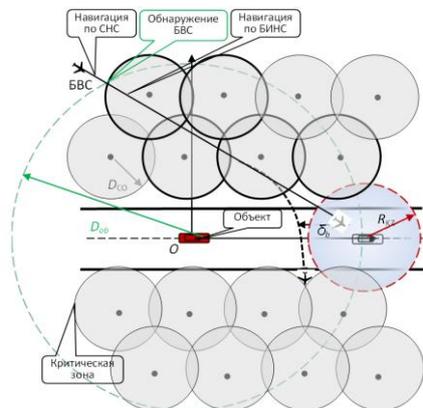


Рис. 1. Схема тактического эпизода

Необходимо разработать математическую модель оценки эффективности защиты подвижного объекта от БВС при различных вариантах его движения:

- ◆ равномерного-прямолинейного движения;
- ◆ неравномерного и непрямолинейного движения;
- ◆ плотной застройки или горного района, влияние которых сказывается на дальности обнаружения, которая падает из-за затухания или переотражения сигнала от БВС при различной ориентации улиц/ущелий.

Будем считать, что система защиты подвижного объекта эффективна, если она обеспечивает отведение БВС от критической зоны. Поэтому в работе в качестве показателя эффективности принята вероятность отведения БВС от критической зоны.

Для оценки эффективности системы защиты рассмотрим особенности эффективности защиты подвижного объекта.

Особенности эффективности защиты подвижного объекта. Отведение БВС от критической зоны осуществляется за счет своевременного отключения у БВС навигации по сигналам спутниковых навигационных систем (СНС). Своевременность отключения СНС обеспечивается за счет дальности обнаружения БВС. Поэтому первое, от чего зависит эффективность отведения БВС от критической зоны – это от дальности обнаружения БВС.

Дальность обнаружения определяется, прежде всего, возможностями самих средств обнаружения. Кроме того, значение имеет расположение средства обнаружения: в низине или на возвышенности, с затенением или без.

Второе, чем определяется вероятность отведения – это размерами критической зоны вокруг охраняемого объекта. Размеры зоны определяются, прежде всего, опасностью видеосъемки или сброса полезной нагрузки.

Третье, чем определяется вероятность отведения – это направлением движения БВС: наиболее уязвимое для охраняемого объекта является движение БВС по направлению к точке встречи при текущих скоростях движения его и охраняемого объекта. В связи с этим при оценке эффективности необходимо рассматривать наихудший для охраняемого объекта вариант движения БВС в направлении точки их встречи.

Исходя из сказанного, математическая модель оценки эффективности защиты охраняемого объекта должна учитывать все вышесказанное как это было сделано, например, в [11–14]. В связи с этим рассмотрим подробнее каждый из указанных факторов, влияющих на эффективность защиты подвижного охраняемого объекта.

Формирование дальности обнаружения. Пусть для увеличения дальности обнаружения построена система защиты в несколько эшелонов [15].

При дальности обнаружения D_{CO} ширина полосы вокруг положения маршрута движения охраняемого объекта с учетом расположения СО в шахматном порядке 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.

При определении топологии размещения СО исходим из обязательного условия обнаружения БВС СО. Для этого средства обнаружения должны быть так размещены, чтобы для любой j -ой точки пространства в защищаемой области найдется, по крайней мере, одна i ' зона обзора, в пределах которой эта точка окажется, то есть:

$$\forall i \in [1; N] \quad \exists i' : (X_b - X_{zo i'})^2 + (Y_b - Y_{zo i'})^2 < R_{zo i'}^2 \quad (3)$$

Обозначим множество точек защищаемой области M_o . Площадь области, покрываемой зонами обзора, обозначим S_{ZO} и определим как площадь, покрываемую множеством точек, удовлетворяющих выражению:

$$S_{ZO} = \left(\bigcup_{i=1}^N S_{zo i} \right) \cap M_o \quad (4)$$

где $S_{zo i}$ – площадь i -ой зоны обзора, определяется выражением: $S_{zo i} = \pi R_{zo i}^2$.

Тогда вероятность обнаружения БВС определяется выражением:

$$\begin{cases} P = \frac{S_{ZO}}{S_o} & \text{при } S_{ZO} < S_o \\ P = 1 & \text{при } S_{ZO} \geq S_o \end{cases} \quad (5)$$

где $S_o = \pi D_{CO}^2$

Для определения топологии размещения средств обнаружения и их координат рассматриваемая задача формализована как задача о покрытии [16, 17].

Исходными данными задачи о покрытии множества является конечное множество U (охраняемая область) и семейство S его подмножеств (зоны обзора). Покрытием называют семейство $C \subseteq S$ наименьшей мощности, объединением которых является U .

При определении топологии размещения СО решение возможно перебором различных вариантов, однако в целях экономии временных и вычислительных ресурсов целесообразно использовать традиционный в таких случаях жадный алгоритм [18–21].

Следуя жадному алгоритму, выбиралось множество зон обзора, руководствуясь следующим правилом: на каждом этапе выбирается множество зон обзора, покрывающее максимальное число точек ещё не покрытых частей защищаемой территории.

Если небольшие участки останутся незакрытыми или имеются зоны тени, то следуя жадному алгоритму, выбирается под каждый такой участок дополнительное средство обнаружения.

Такое постепенное покрытие защищаемой области зонами обзора средств обнаружения происходит до тех пор, пока не произойдет одно из следующих событий:

- ◆ закончился запас средств обнаружения;
- ◆ вся защищаемая область покрыта зонами обнаружения.

Определение размера критической зоны. Для определения отклонения БВС от критической зоны необходимо знать ее размер.

Размер критической зоны определяется скоростью движения БВС и ошибками навигационного оборудования, находящегося у него на борту.

По результатам исследований, приведенных в [15], радиус критической зоны принят равным 100 м. Именно в этих пределах приближение БВС к охраняемому объекту опасно, прежде всего, из-за возможного проведения видео- и фотосъемки, а также – из-за возможной доставки полезной нагрузки.

Для отведения БВС от критической зоны в [15] показано, что при уходе точности определения местоположения за 1 мин на δ_{b1} по горизонтали – для ухода точности на R_{KZ} потребуется время t_b , за которое БВС, двигаясь со скоростью V_b и ориентируясь по БИНС, преодолеет расстояние:

$$S_b = V_b \cdot R_{KZ} / \delta_{b1}. \quad (6)$$

В связи с этим в [15] предложено располагать СО вокруг подвижного охраняемого объекта таким образом, чтобы обеспечить дальность обнаружения средств обнаружения D_{CO} , близкую к S_b .

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 СО размещают таким образом, чтобы обеспечить требуемую дальность обнаружения БВС.

Для эффективной защиты подвижного объекта сформированы основные принципы топологии размещения СО, обеспечивающие требуемую дальность обнаружения.

Направление движения БВС. Модель движения охраняемого объекта представим в виде:

$$\begin{aligned}x_a(t) &= x_{a0} + V_{ax} \cdot t \cdot \sin Q_a \\y_a(t) &= y_{a0} + V_{ay} \cdot t \cdot \cos Q_a.\end{aligned}\quad (7)$$

где Q_a – курс охраняемого объекта.

Модель движения БВС:

$$\begin{aligned}x_b(t) &= x_{b0} + V_{bx} \cdot t \cdot \sin Q_b \\y_b(t) &= y_{b0} + V_{by} \cdot t \cdot \cos Q_b\end{aligned}\quad (8)$$

Определим курс БВС, направленный в упреждающую точку встречи с охраняемым объектом.

При движении БВС с постоянной скоростью V_b и курсом Q_b сближение с охраняемым объектом в точке С определяется соотношением:

$$\frac{\sin q_a}{\sin q_b} = \frac{V_b}{V_a}, \quad (9)$$

где q_a и q_b – курсовые углы охраняемого объекта и БВС соответственно. Под курсовым углом будем понимать [22] 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.

Предполагается, что первоначально момент появления БВС, его координаты, курс и скорость не известны, однако по результатам его попадания в зоны обзора средств обнаружения параметры его движения становятся известными.

Наихудший вариант для охраняемого объекта – движение БВС в упрежденную точку встречи, определяется, исходя из координат БВС x_b, y_b , известных скоростях V_a и V_b и координатах 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. 2).

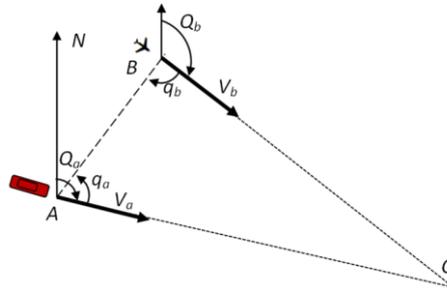


Рис. 2. Взаимное положение охраняемого объекта и БВС для расчета курса сближения БВС с охраняемым объектом

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

$$Q_b = \arctg\left(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}\right). \quad (10)$$

Расчет относительной скорости БВС V_p :

$$V_p = -V_b \cdot \cos Q_b \pm \sqrt{V_b^2 - V_a^2 + \sin^2 \xi}. \quad (11)$$

Из треугольника скоростей по теореме косинусов получаем выражение:

$$V\rho = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 - 2V_a V_b \cos \xi}, \quad (12)$$

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:

$$Q_b = Q_a + \xi. \quad (13)$$

Определение вероятности обнаружения БВС. При движении БВС по направлению к охраняемому объекту происходит последовательное пересечение БВС зон обзора (ЗО) СО в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_M , где M – количество пересечаемых зон.

Полагаем, что БВС обнаружено, если в ходе движения оно попало в пределы зоны обзора i -го средства обнаружения:

$$\left(X_b - X_{zoi}\right)^2 + \left(Y_b - Y_{zoi}\right)^2 < R_{zoi}^2, \quad (14)$$

где $X_{zoi} Y_{zoi}$ – координаты положения средств обнаружения

R_{zoi} – радиус зоны обзора средств обнаружения, равный дальности обнаружения СО.

Поэтому в результате пересечения M зон обзора (например, на рис. 1, $M=3$), вероятность обнаружения пролетающего БВС определяется выражением:

$$P_{об} = 1 - (1 - P_0)^M. \quad (15)$$

Попадание БВС в критическую зону характеризуется условием:

$$\left(X_b - X_a\right)^2 + \left(Y_b - Y_a\right)^2 < R_{KZ}^2. \quad (16)$$

Как только вероятность совокупного обнаружения по зонам обзора, в которые попал БВС, превысила заданный порог, с этого момента считается, что включилась система отведения БВС от критической зоны, и БВС переходит на навигацию по БИНС. Это означает, что с этого момента координаты положения БВС имеют добавленную ошибку, вследствие чего БВС начинается смещаться в сторону от прежнего курса Q_b .

Для получения оценки эффективности защиты подвижного объекта необходимо определить, удалось ли отвести БВС от критической зоны, которая перемещается вместе с подвижным объектом, или нет.

Математическая модель оценки эффективности системы защиты подвижного объекта от БВС. Математическая модель оценки эффективности системы защиты подвижного объекта от БВС описывает параллельно протекающие или слабо связанные между собой процессы:

- ◆ движение охраняемого объекта по заданной траектории по (7);
- ◆ формирование критической области по (6);
- ◆ движение БВС, которое направлено в гипотетическую точку пересечения с траекторией движения охраняемого объекта (8);
- ◆ попадание в зону обзора средств обнаружения по (14), из-за которой в результате происходит отклонение БВС с прежнего направления;
- ◆ попадание БВС в критическую зону по (16).

Результатом этих параллельно протекающих процессов является прохождение БВС вне критической зоны.

Из-за наличия случайных факторов, которые заранее неизвестны, воспользуемся методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) при моделировании.

При использовании метода статистических испытаний разыгрываются случайные значения заранее не известных параметров. Чтобы исключить предвзятость в выборе случайных чисел и зависимости результата от выбранного числа, проводится серия испытаний. По результатам серии испытаний оценивается вероятность $P_{\text{вм}}$ отведения БВС от критической зоны как отношение результативных испытаний к общему количеству проведенных испытаний.

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

Тем самым определяется оценка эффективности работы системы защиты подвижного охраняемого объекта от БВС.

Для определения результативности испытаний в каждом испытании задаются исходные данные:

- ◆ маршрут следования охраняемого объекта в виде координат путевых точек, включая точку старта;
- ◆ скорость охраняемого объекта V_a ;
- ◆ внешние условия – равнинные, горные или городские с плотной застройкой;
- ◆ момент времени появления, координаты начального положения и скорость БВС V_b ;

- ◆ вероятность обнаружения БВС при нахождении его в зоне обзора P_0 .

В момент старта моделирования:

- ◆ начинается движение охраняемого объекта со скоростью V_a ;
- ◆ разыгрываются координаты начального положения БВС;
- ◆ определяет направление движения БВС по начальным координат БВС, которое ориентировано на точку потенциальной встречи с движущимся охраняемым объектом.

После этого – начинается цикл по времени, время представлено в виде тактов имитации заданной длительности Δt .

В каждом такте имитации происходит:

- ◆ расчет текущих координат охраняемого объекта;
- ◆ определение положения подвижной критической зоны радиуса $R_{\text{КЗ}}$ вокруг охраняемого объекта, в которую не должен попасть БВС;
- ◆ расчет текущего положения БВС в предположении их определения по сигналам СНС и его равномерном и прямолинейном движении.

В ходе движения БВС оценивается его попадание в зоны обнаружения средств обнаружения по результатам выполнения условия (14). При попадании БВС в зону обзора средства обнаружения считается, что БВС обнаружен. После обнаружения БВС спустя некоторое известное время, необходимое для подтверждения обнаружения и включения системы противодействия, происходит переход БВС от навигации по СНС к навигации по БИНС.

С этого момента времени предполагается, что происходит постепенное с течением времени накопление ошибки п БИНС, и, как следствие, отклонение БВС от изначального направления движения.

При дальнейшем движении по БИНС происходит определение направления движения БВС с ошибкой, значение которой разыгрывается случайным образом в заданных пределах δ . Из-за ошибочной навигации происходит отклонение БВС от заданного маршрута движения, направленного на охраняемый объект. Одновременно происходит оценка расстояния между движущимся охраняемым объектом и БВС.

Постоянно в каждом такте имитации проверяется выполнение условие (16) попадания БВС в пределы критической зоны. Если условие (16) выполнено, то есть БВС попал в пределы критической зоны, то регистрируется нерезультативное испытание, и моделирование испытания заканчивается. Если условие (16) не вы-

полнено, то моделирование процессов движения БВС, движения охраняемого объекта, пересечения зон обзора СО, перемещения критической зоны продолжается до тех пор, пока БВС не пересечет трассу движения охраняемого объекта. После этого предполагается, что БВС при дальнейшем движении ни при каких условиях не окажется в пределах критической зоны. В этом случае считается, что испытание результативно.

При определенном сочетании скоростей охраняемого объекта и БВС может оказаться, что БВС никогда не попадет в пределы критической зоны:

- ◆ если БВС настолько медленный, что не успевает даже по траверзу приблизиться к траектории движения охраняемого объекта;

- ◆ если их курсы движения охраняемого объекта и БВС параллельны, но эта и предыдущая ситуации не могут возникнуть из-за особенностей рассматриваемой задачи: БВС стремится к охраняемому объекту;

- ◆ БВС будет долго и медленно следовать к точке встречи с охраняемым объектом: в этом случае у него может просто не хватить энергоресурса.

Результаты численного эксперимента. Целью проведения численного эксперимента являлось определение зависимости вероятности отведения БВС от критической при различных скоростях движения БВС из заданного диапазона.

Если БВС летит по траверзу к маршруту движения охраняемого объекта, а это наиболее логичный вариант, то время от обнаружения до встречи – мало, и отклонение на требуемую величину может и не успеть произойти.

Если же предположить, что охраняемый объект движется с высокой скоростью, то БВС ничего не остается, как двигаться практически параллельным курсом, 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, скользкого покрытия, дороги серпантинном и т.д.

При оценке влияния скорости БВС на эффективность защиты для каждого значения скорости БВС регистрировались:

- ◆ расчетный курс БВС в точку встречи;
- ◆ количество пройденных зон обзора средств обнаружения;
- ◆ вероятность обнаружения БВС;
- ◆ момент времени, с которого начинается отклонение БВС от начального курса;
- ◆ курс БВС в момент прохождения траектории движения охраняемого объекта (если это происходит) или в момент попадания БВС в критическую зону;
- ◆ эффективность отклонения БВС от критической зоны.

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

Вероятность обнаружения БВС при нахождении его в зоне обзора принималась равной $P_0 = 0,95$.

Отклонение при навигации по БИНС на $0,5^\circ + \text{Rand}[0;1]$.

Скорость БВС V_b перебиралась из диапазона [52,5; 127,5] км с шагом 7,5 км.

Результаты моделирования показали следующее.

При движении БВС на скорости, сопоставимой с движением охраняемого объекта, направление к точке встречи практически параллельно траектории движения охраняемого объекта. в связи с этим отведение БВС от движущейся вместе с объектом критической зоны практически гарантировано.

С увеличением скорости движения БВС траектория приближается постепенно к траверзной, БВС быстрее достигает траектории движения охраняемого объекта и все чаще успевает попасть в критическую зону, несмотря на отклонение из-за перехода на БИНС.

Сказанное подтверждает зависимость вероятности отведения БВС от критической зоны при различных скоростях движения БВС; зависимость представлена на рис. 3.

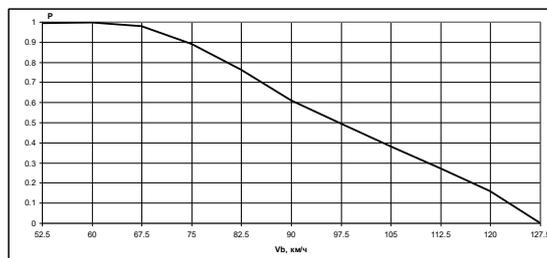


Рис. 3. Зависимость вероятности отведения БВС от критической зоны при различных скоростях полета БВС

Из результатов, представленных на рис. 3, видно, что при скоростях, близких к скорости движения охраняемого объекта, вероятность отведения равна 1, с увеличением скорости движения БВС вероятность постепенно падает до 0,8 при движении БВС на скорости 82,5 км/ч, и до 0,2 при скорости движения БВС 115 км/ч.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для повышения эффективности защиты охраняемого объекта от БВС целесообразно двигаться со скоростью, сопоставимой со скоростью БВС, то есть свыше 100 км/ч. Однако этому могут помешать осадки, качество дорожного покрытия, извилистость трассы, по которой следует охраняемый объект.

Заключение. При рассмотрении задачи защиты подвижного охраняемого объекта от БВС предложен метод оценки эффективности защиты и математическая модель, реализующая предложенный метод.

В предложенном методе оценивается критическая область вокруг охраняемого объекта, от которой необходимо отвести БВС; определяется дальность, с которой БВС должен быть обнаружен; оценивается курс БВС в точку встречи с охраняемым объектом, анализируется попадание БВС в зоны обзора, регулярно размещенные вдоль трассы движения охраняемого объекта, определяется вероятность обнаружения, и в зависимости от нее – переход БВС на навигацию по БИНС, определяются попадание БВС в пределы критической зоны.

В качестве показателя эффективности предложено использовать вероятность отведения БВС от критической зоны.

Расчет показателя эффективности осуществлялся методом статистических испытаний.

Разработанная математическая модель оценки эффективности была использована при проведении численного эксперимента при оценке вероятности отведения БВС от критической зоны при различных его скоростях.

Предложенные метод и математическая модель могут быть использованы также и в подводной морской среде при оценке эффективности защиты охраняемого обитаемого/необитаемого объекта от морских робототехнических комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаренко С.И. Противостояние беспилотным летательным аппаратам: монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
2. Классификация БПЛА по летным характеристикам. – Свободный режим доступа: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>.
3. DJI Mavic 2 Pro - Drone Quadcopter UAV with Hasselblad Camera 3-Axis Gimbal HDR 4K Video Adjustable Aperture 20MP 1" CMOS Sensor, up to 48mph, Gray. – Свободный режим доступа: <https://www.amazon.com/DJI-Quadcopter-Hasselblad-Adjustable-Aperture/dp/B07GDC5X74> (дата обращения: 03.03.2023).

4. Phantom 4 Pro V2.0. – Свободный режим доступа: https://www.amazon.com/DJI-Phantom-Pro-V2-0-White/dp/B07CXX39Y7/ref=sr_1_6?crd=49MI5QNHNAAT&keywords=Phantom+4+Pro+V2.0&qid=1677785368&sprefix=phantom+4+pro+v2.0+%2Caps%2C173&sr=8-6 (дата обращения: 03.03.2023).
5. БЛА Т23Э. – Свободный режим доступа: https://web.archive.org/web/20081211023223/http://www.enics.ru/detail?product_id=20 (дата обращения: 03.03.2023).
6. Куб-БЛА. – Свободный режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%B1-%D0%91%D0%9B%D0%90> (дата обращения: 03.03.2023).
7. Системы и средства для обнаружения беспилотников (БПЛА). – <https://anti-dron.ru/blog/sistemy-i-sredstva-dlya-obnaruzheniya-bespilotnikov-i-effektivnost-ikh-primeneniya.html> (дата обращения: 03.03.2023).
8. *Филин Е.Д., Киричек Р.В.* Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 87-93.
9. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников. – Свободный режим доступа: <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov> (дата обращения: 03.03.2023).
10. *Нагин И.А., Мухамедзянов Т.А.* Экспериментальные исследования алгоритма комплексирования в инерциально-спутниковой навигационной системе NV216С-IMU // Перспективные системы и задачи управления: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции и XIII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2022. – С. 153-159.
11. *Мартынова Л.А., Маиошин А.И., Пашкевич И.В.* Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016); Матер. 9-ой Мультиконференции по проблемам управления. Председатель президиума мультиконференции В.Г. Пешехонов. – 2016. – С. 205-209.
12. *Мартынова Л.А., Маиошин А.И.* Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нештатных ситуациях // Экстремальная робототехника. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 86-91.
13. *Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.* Определение эффективного поведения группы АНПА в сетевидной системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 3 (88). – С. 47-57.
14. *Мартынова Л.А.* Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2 (87). – С. 77-87.
15. *Корякин А.В., Ланцов В.В., Мартынова Л.А.* Формирование комплекса обнаружения беспилотного летательного аппарата – элемента морской роботизированной системы // Управление в морских системах (УМС-2022): 15-я Мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. – СПб., 2022. – С. 20-23.
16. *Ali J., Dyo V.* Coverage and Mobile Sensor Placement for Vehicles on Predetermined Routes: A Greedy Heuristic Approach (SCITEPRESS, Madrid, 2017). – P. 83-88.
17. *Cruz Caminha P.H., Souza Couto R. De, Maciel Kosmowski Costa L.H., Fladenmuller A., Amorim M. Dias de On* the Coverage of Bus-Based Mobile Sensing, 2018. MDPI. Basel.
18. *Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C.* Introduction to Algorithms. – MIT Press. Massachusetts, 2009. – 984 p.
19. *Cai X.* Canonical Coin Systems for Change-Making Problems // IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS). Danvers. – 2009. – P. 499-504.
20. *Edmonds J.* Matroids and the greedy algorithm. – Springer, Berlin, 1971. – P. 127-136.
21. *Curtis S.* The classification of greedy algorithms. – Elsevier. Amsterdam, 2003. – P. 125-157.
22. *Абчук В., Суздаль В.* Поиск объектов. – М.: Сов. Радио, 1977. – 334 с.

REFERENCES

1. *Makarenko S.I.* Protivodeystvie bespilotnym letatel'nyim apparatam: monografiya [Countermeasures against unmanned aerial vehicles: monograph]. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 p.
2. Klassifikatsiya BPLA po letnym kharakteristikam. Free access mode: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>.

3. DJI Mavic 2 Pro - Drone Quadcopter UAV with Hasselblad Camera 3-Axis Gimbal HDR 4K Video Adjustable Aperture 20MP 1" CMOS Sensor, up to 48mph, Gray. Free access mode: <https://www.amazon.com/DJI-Quadcopter-Hasselblad-Adjustable-Aperture/dp/B07GDC5X74> (accessed 03 March 2023).
4. Phantom 4 Pro V2.0. Free access mode: https://www.amazon.com/DJI-Phantom-Pro-V2-0-White/dp/B07CXX39Y7/ref=sr_1_6?crid=49MI5QNHNAAT&keywords=Phantom+4+Pro+V2.0&qid=1677785368&sprex=phantom+4+pro+v2.0+%2Caps%2C173&sr=8-6 (accessed 03 March 2023).
5. BLA T23E [UAV T23E]. Free access mode: https://web.archive.org/web/20081211023223/http://www.enics.ru/detail?product_id=20 (accessed 13 May 2022).
6. Kub-BLA [Cube UAV]. Free access mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%B1-%D0%91%D0%9B%D0%90> (accessed 03 March 2023).
7. Sistemy i sredstva dlya obnaruzheniya bespilotnikov (BPLA) [Systems and means for detecting unmanned aerial vehicles (UAVs)]. Free access mode: <https://anti-dron.ru/blog/sistemy-i-sredstva-dlya-obnaruzheniya-bespilotnikov-i-effektivnost-ikh-primeneniya.html> ((accessed 03 March 2023).
8. *Filin E.D., Kirichek R.V.* Metody obnaruzheniya malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove analiza elektromagnitnogo spektra [Methods for detecting small unmanned aerial vehicles based on the analysis of the electromagnetic spectrum], *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* [Information technologies and telecommunications], 2018, Vol. 6, No. 2, pp. 87-93.
9. Sistemy obnaruzheniya i neytralizatsii bespilotnikov [Systems for detecting and neutralizing drones]. Free access mode: <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizatsii-bespilotnikov> (accessed 03 March 2023).
10. *Nagin I.A., Mukhamedzyanov T.A.* Eksperimental'nye issledovaniya algoritma kompleksirovaniya v inertial'no-sputnikovoy navigatsionnoy sisteme NV216C-IMU [Experimental studies of the integration algorithm in the NV216C-IMU inertial satellite navigation system], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIII molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Perspective systems and control tasks: materials of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference and the XIII Youth School-Seminar "Control and Information Processing in Technical Systems"]. Taganrog: IP Maruk M.R., 2022, pp. 153-159.
11. *Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V.* Podkhody k otsenke effektivnosti avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Approaches to evaluating the effectiveness of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh (UMAS-2016): Mater. 9-oy Mul'tikonferentsii po problemam upravleniya. Predsedatel' prezidiuma mul'tikonferentsii V.G. Peshekhonov* [Management in marine and aerospace systems (UMAS-2016). Materials of the 9th Multiconference on Management Problems. Chairman of the presidium of the multiconference V.G. Peshekhonov], 2016, pp. 205-209.
12. *Martynova L.A., Mashoshin A.I.* Osobennosti otsenki effektivnosti funktsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov v neshtatnykh situatsiyakh [Peculiarities of evaluating the efficiency of functioning of autonomous uninhabited underwater vehicles in emergency situations], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extremal Robotics], 2016, Vol. 1, No. 1, pp. 86-91.
13. *Martynova L.A., Rozengauz M.B.* Opredelenie effektivnogo povedeniya gruppy ANPA v setsetricheskoy sisteme osveshcheniya podvodnoy obstanovki [Determination of the effective behavior of a group of AUVs in a network-centric system for lighting the underwater environment], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, No. 3 (88), pp. 47-57.
14. *Martynova L.A.* Instrumentariy dlya issledovaniy effektivnosti vedeniya seysmorazvedki s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Tools for researching the effectiveness of seismic surveys using autonomous uninhabited underwater vehicles], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2017, No. 2 (87), pp. 77-87.
15. *Koryakin A.V., Lantsov V.V., Martynova L.A.* Formirovanie kompleksa obnaruzheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata – elementa morskoy robotizirovannoy sistemy [Formation of a detection complex for an unmanned aerial vehicle - an element of a marine robotic system], *Upravlenie v morskikh sistemakh (UMS-2022): 15-ya Mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya. Materialy konferentsii* [Management in Marine Systems (UMS-2022). 15th Multiconference on Management Problems. Conference materials]. Saint Petersburg, 2022, pp. 20-23.
16. *Ali J., Dyo V.* Coverage and Mobile Sensor Placement for Vehicles on Predetermined Routes: A Greedy Heuristic Approach (SCITEPRESS, Madrid, 2017), pp. 83-88.

17. Cruz Caminha P.H., Souza Couto R. De, Maciel Kosmowski Costa L.H., Fladenmuller A., Amorim M. Dias de On the Coverage of Bus-Based Mobile Sensing, 2018. MDPI. Basel.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms. MIT Press. Massachusetts, 2009, 984 p.
19. Cai X. Canonical Coin Systems for Change-Making Problems, *IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS)*. Danvers, 2009, pp. 499-504.
20. Edmonds J. Matroids and the greedy algorithm. Springer, Berlin, 1971, pp. 127-136.
21. Curtis S. The classification of greedy algorithms. Elsevier. Amsterdam, 2003, pp. 125-157.
22. Abchuk V., Suzdal' V. Poisk ob"ektov [Search for objects]. Moscow: Sov. Radio, 1977, 334 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор Г.С. Малышкин.

Ланцов Валентин Вадимович – Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем (ГосНИИПП); e-mail: well999@list.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89811570699; соискатель, инженер-программист.

Ланцов Константин Вадимович – e-mail: stawrkest999@mail.ru; тел.: 89118108819; соискатель; инженер-программист.

Корякин Александр Викторович – e-mail: koral.spb@yandex.ru; тел.: 89117771452; д.т.н.; с.н.с.; г.н.с.

Мартынова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Lantsov Valentin Vadimovich – State Research Institute of Applied Problems (GosNIIPP); e-mail: well999@list.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +79811570699; applicant; software engineer.

Lantsov Konstantin Vadimovich – e-mail: stawrkest999@mail.ru; phone: +79118108819; applicant; software engineer.

Koryakin Aleksandr Viktorovich – e-mail: koral.spb@yandex.ru; phone: +79117771452; dr. of eng. sc.; senior researcher; chief researcher.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc., senior researcher, leading researcher.

УДК 004.738.5: 621.391

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-53-65

Г.П. Виноградов

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ЗНАНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ

Предметом исследования являются методы интеллектуализации автоматизированных систем и комплексов в ВС РФ на базе использования моделей и технологий, основанных на знаниях, а также реагирующих беспроводных сенсорных сетей (RWSN), которые имеют большую перспективу применения особенно при проведении локальных спецопераций силами мобильных тактических групп. Актуальность работы связана с тем, что динамика современного боестолкновения предполагает оперативную концентрацию всех видов информации при принятии адекватных боевой ситуации решений, что позволяет реализовать новый подход к ведению боевых действий, основанный на интеграции систем всех уровней и родов войск. Формой интеграции является тактическая группа. Реализация подхода требует при принятии решений построение цикла знаний, включающего этапы восприятия, представления, осознания и их пополнения на базе новых архитектур построения и использования информационных технологий. Целью работы является исследование возможности построения информационной системы обеспечения данными одного из ключевых этапов – этапа приобретения знаний из распределенных источников при использовании в качестве первичного элемента системы реагирующих сенсорных сетей. Основные ре-