

УДК 004.942

Оценка эффективности системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом имитационного моделирования

Федулов В. А., Быков Н. В., Баскаков В. Д.

Постановка задачи: разработать методику оценки эффективности на основе имитационной модели (ИМ) системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которая бы позволяла проверять эффективность конкретных технических решений на начальных этапах проектирования таких систем противодействия. На сегодняшний день неизвестны работы по исследованию комплексных, состоящих из множества различных по назначению и характеристикам, систем противодействия БПЛА. **Целью работы** является обеспечение возможности оценки эффективности системы борьбы с малыми БПЛА на ранних этапах проектирования, проведения сравнительной оценки различных вариантов систем поражения БПЛА, а также использование имитационной модели системы поражения БПЛА для решения различных обратных (в частности, оптимизационных) задач, связанных с противодействием малоразмерным БПЛА, и формирования методики синтеза наиболее эффективных систем противодействия. **Используемые методы:** основным методом моделирования является метод Монте–Карло. При моделировании накапливаются данные, позволяющие рассчитывать такие показатели эффективности системы поражения БПЛА, как: вероятность нейтрализации БПЛА; расход средств поражения; время выполнения системой противодействия своей задачи; вероятность вывода из строя элементов системы противодействия и др. Подход дискретно-событийного моделирования позволяет моделировать продолжительные процессы, происходящие в практически неограниченном пространстве. Состояние объектов в ИМ и переходы между состояниями описываются стохастическими конечными автоматами. Траектория БПЛА моделируется кривой Безье третьего порядка. Данный подход широко распространён в исследованиях, связанных с движением БПЛА. Учитывается геометрия БПЛА и изменение его ориентации в процессе полёта. При этом плавная интерполяция матриц поворота осей связанной с БПЛА системы координат осуществляется с помощью сферической интерполяции кватернионов. Факт обнаружения целей радиолокационной системой устанавливается согласно критерию Неймана–Пирсона. **Новизна** обусловлена: возможностью моделирования систем поражения БПЛА, состоящих из нескольких взаимосвязанных средств нейтрализации и обнаружения целей. Учитывается возможность вывода из строя элементов системы противодействия. Возможно оценивать эффективность системы по различным критериям. Также сформулирован новый критерий эффективности – вероятность падения сбитых БПЛА в запретные (защищаемые) зоны, соответствующие, например, критически важным объектам. **Новизна** также обусловлена совокупностью применяемых методов при разработке ИМ и её программной реализации – дискретно-событийный подход применяется в контексте объектно-ориентированного и агентного программирования, что делает возможным моделирование различного поведения агентов (моделей БПЛА, подсистем обнаружения и нейтрализации из состава системы поражения). **Результат:** разработанная ИМ позволяет за разумное время и при ограниченной вычислительной мощности оценить эффективность различных вариантов системы поражения БПЛА при разных сценариях и фоноцелевой обстановке. **Практическая значимость:** разработанная ИМ может использоваться и совершенствоваться в ходе научно-исследовательских работах и на начальных этапах опытно-конструкторской работы

Библиографическая ссылка на статью:

Федулов В. А., Быков Н. В., Баскаков В. Д. Оценка эффективности системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 63-104. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-63-104

Reference for citation:

Fedulov V. A., Bykov N. V., Baskakov V. D. Estimating of the Effectiveness of the Weapon System against of Small Unmanned Aerial Vehicles by Computer Simulation. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 63-104 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-63-104

по созданию новых и совершенствованию существующих систем противодействия БПЛА для более строгого обоснования технических решений.

Ключевые слова: система поражения, малоразмерный БПЛА, имитационное моделирование, эффективность, обнаружение малоразмерных БПЛА, огневое поражение, радиолокация, критическая инфраструктура.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) бурно развиваются и совершенствуются и уже получили широкое распространение. Они относительно дешёвы, технологичны, значительная их часть создаёт мало шума. При этом БПЛА обладают возможностями к дальнейшему развитию вследствие совершенствования микроэлектроники, программного обеспечения и т. д.

В данной статье речь идёт о малоразмерных БПЛА типа «коптер» (рис. 1), которые имеют габариты до 2 м, массу до 10 кг и способны поднимать груз массой до 1 кг. Тяга создаётся пропеллерами, вращение которых обеспечивается электродвигателями. Такие малоразмерные БПЛА, как правило, изготавливаются из пластмасс и почти не содержат в себе металлов. Часто, единственный металлосодержащий элемент конструкции – это небольшой электродвигатель. Характерная величина эффективной поверхности рассеяния у таких БПЛА имеет порядок 0,001 м².



Рис. 1. Примеры малоразмерных БПЛА

На сегодняшний день малоразмерные БПЛА применяются в различных сферах деятельности:

- как часть «интернета вещей» (Internet of Things – IoT) «умного города», когда они входят в городскую инфраструктуру в качестве умных датчиков [1, 2];
- для доставки товаров и услуг [3];
- для мониторинга городского трафика, экологии, инфраструктуры и т. д. [4];
- как часть правоохранительной и/или охранных систем [5]: видеонаблюдение, охрана особо важных объектов (например, аэропортов) и т. д.;
- для помощи в ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и т. п.

В то же время БПЛА могут применяться для контрабанды, промышленного шпионажа и т. д. [6, 7]. Это приводит к необходимости разработки средств и методов противодействия противоправным действиям с использованием БПЛА.

События последних лет (боевые действия в Сирии, Нагорном Карабахе, Украине) показали возможности использования БПЛА, в частности квадрокоптеров, в условиях вооружённого конфликта [8-10]:

- террористы используют одноразовые самодельные БПЛА, снаряжённые чем-либо взрывоопасным, для совершения массированных налётов на военные базы и объекты гражданской инфраструктуры, совершения терактов;
- технически более развитые противоборствующие стороны во время боевых действия используют куда более широкий спектр БПЛА: БПЛА-камикадзе, барражирующие боеприпасы, многоразовые разведывательные БПЛА (в т. ч. и коммерческие) для наведения и корректировки артиллерийского огня, атакующие БПЛА и др.

В настоящее время ведутся работы по объединению БПЛА в организованные группы [11-13] для более эффективного выполнения задач, что несёт в себе ряд серьёзных потенциальных угроз. Группа малоразмерных БПЛА с точки зрения противодействия является гораздо более сложной целью, нежели отдельные летательные аппараты. Это связано с возможностью распределения ролей в группе (разведчики, атакующие, исполнители и др.) при уничтожении отдельных членов группы, а также с активным информационным обменом между БПЛА, что ведёт к лучшей ситуационной осведомлённости группы. Вследствие хорошей осведомлённости алгоритмы поиска, оптимизации и принятия решений в системе управления группой могут находить гораздо более эффективные решения поставленной перед ней задачи.

В связи с изложенным выше остро встаёт проблема эффективного противодействия малым БПЛА [5, 14]. Система поражения (противодействия) БПЛА является сложной технической системой, состоящей из множества различных по составу, структуре и характеристикам подсистем, обеспечивающих обнаружение и нейтрализацию целей. Поэтому на начальных этапах проектирования такой системы может возникнуть большое количество вариантов её исполнения. Чтобы ограничить множество возможных технических решений, необходимо иметь инструмент оценки эффективности системы противодействия БПЛА. В данной работе приведено описание разработанной имитационной модели (ИМ) системы поражения БПЛА, с помощью которой можно решать указанную задачу – оценивать эффективность различных вариантов системы поражения при различных сценариях возникновения угроз.

В работе приняты сокращения, представленные в таблице 1, и обозначения, приведённые в таблице 2.

Таблица 1 – Принятые сокращения

Сокращение	Расшифровка
БП	– боеприпас
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат
ГСК	– глобальная система координат
ИМ	– имитационная модель
КЗП	– координатный закон поражения
КП	– картинная плоскость
ЛСК	– локальная система координат
ПЭ	– поражающий элемент
РЛС	– радиолокационная станция
СВ	– средство воздействия
СКО	– среднее квадратическое отклонение
СТП	– средняя точка попаданий
СУ	– система управления
ЭПР	– эффективная площадь рассеяния

Таблица 2 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
\mathbf{r}	– радиус-вектор точки в пространстве
\mathbf{v}	– вектор скорости точки
t	– модельное время
$\tau \in [0; 1]$	– относительное время
T	– итоговое значение модельного времени
q	– кватернион
ρ	– функция плотности вероятности
\mathbf{x}	– случайный вектор
μ	– вектор математический ожиданий компонент случайного вектора
Σ	– ковариационная матрица
$\zeta = (\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$	– ортонормированный базис из трёх векторов-столбцов
\mathbf{R}	– матрица поворота.

1. Способы обнаружения малоразмерных БПЛА и противодействия им

Способы обнаружения малых БПЛА и противодействия им, возможности, сильные и слабые стороны этих способов подробно проанализированы в монографии [15], а также в работах [5, 7] и др. На сегодняшний день уже применяются или активно исследуются такие методы обнаружения БПЛА, как радиолокационный, радиотехнический (отслеживание по каналу связи с оператором и др.), оптико-электронный и акустический. Что касается методов противодействия, то среди них выделяют следующие: радиоэлектронное подавление (РЭП) – подавление связи с оператором, GPS-спуфинг и др.; огневое поражение пуля-

ми, дробью и пр.; применение лазеров; использование сетей и БПЛА–перехватчиков.

Согласно указанным работам наиболее универсальным способом борьбы с небольшими БПЛА является их физическое поражение либо мощным сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением, либо огневыми средствами. Эффективным методом обнаружения и целеуказания считается радиолокационный. Поэтому в разработанной ИМ в первую очередь реализованы модели стрелкового оружия, огневых средств воздействия, в т. ч. с готовыми поражающими элементами (ПЭ), и модель радиолокационной станции (РЛС). Средства РЭП на данный момент не моделируются. Можно считать сценарии огневого поражения БПЛА стрелковым оружием без применения средств РЭП наиболее опасными ситуациями.

2. Модель малоразмерного БПЛА

2.1. Модель движения БПЛА

Существует множество подходов к формированию траектории движения БПЛА. Однако в технической литературе и исследованиях из всего множества кривых наиболее часто используют кривые Безье, так как эти гладкие кривые имеют простую параметрическую форму, чем обеспечивается относительно высокая вычислительная производительность. Именно кривые Безье второго и/или третьего порядка использованы, например, в работах [16-21], посвящённых аппроксимации и моделированию реальных траекторий БПЛА. Стоит отметить, что в большей части указанных исследований рассматривается движение БПЛА в среде с препятствиями, следовательно, применение кривых Безье является универсальным методом аппроксимации траектории полёта. Поэтому в данной работе траектория полёта БПЛА аппроксимируется кривой Безье третьего порядка. В модели учтена возможность изменения точки назначения в процессе полёта. При этом новый участок траектории также строится в виде кривой Безье. В этом случае по свойству кривых Безье итоговая траектория также является кривой Безье.

Математически кривая Безье третьего порядка описывается радиус-вектором вида [22, 23]

$$\mathbf{r}(\tau) = (1-\tau)^3 \mathbf{r}_A + \tau(1-\tau)^2 \mathbf{r}_B + \tau^2(1-\tau) \mathbf{r}_C + \tau^3 \mathbf{r}_D, \quad (1)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор центра масс БПЛА; \mathbf{r}_A , \mathbf{r}_B , \mathbf{r}_C и \mathbf{r}_D – радиус-векторы опорных точек траектории БПЛА (см. рис. 2); $\tau(t) = (t - t_s)/(t_f - t_s) \in [0; 1]$ – относительное время; t – абсолютное время; t_s и t_f – начальное и конечное время полёта БПЛА.

Для создания траектории задаются граничные точки траектории А и D, в которых в свою очередь задаётся ориентация БПЛА в пространстве. Радиус-векторы точек В и С рассчитываются следующим образом:

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{r}_A + \mathbf{v}_A \frac{t_f - t_s}{3}, \quad \mathbf{r}_C = \mathbf{r}_D - \mathbf{v}_D \frac{t_f - t_s}{3},$$

где \mathbf{v}_A и \mathbf{v}_D – векторы скорости БПЛА в точках А и D соответственно.

Из (1) легко получить выражение для вектора скорости

$$\mathbf{v}(\tau) = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{3}{t_f - t_s} \left[(1 - \tau)^2 (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A) + 2\tau(1 - \tau)(\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_B) + \tau^2 (\mathbf{r}_D - \mathbf{r}_C) \right].$$

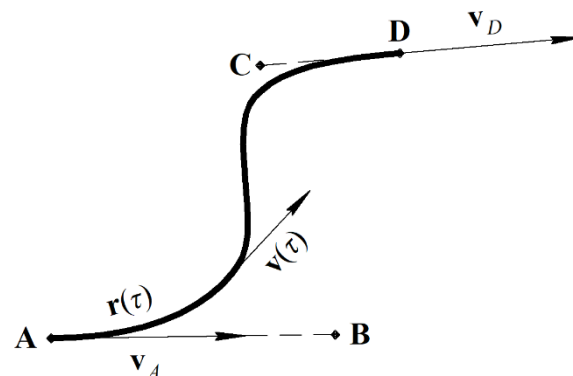
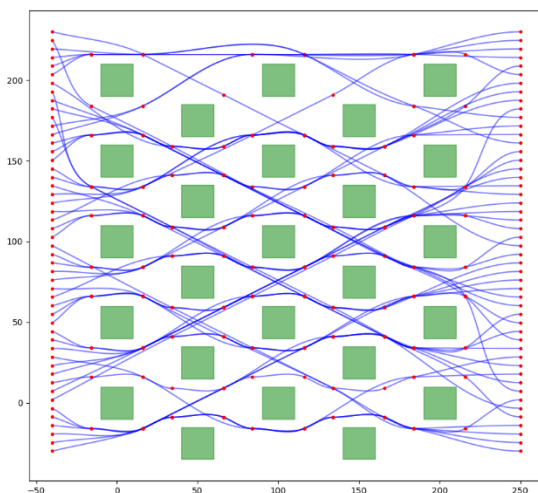
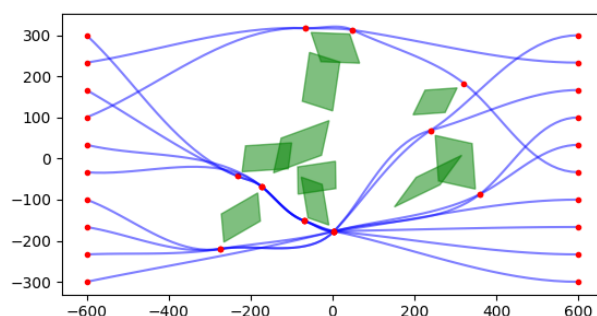


Рис. 2. Траектория БПЛА

В ИМ имеется возможность построения траекторий с облётом препятствий. Для этого используется алгоритм поиска пути, основанный на графе видимости [24]. Пример траекторий полёта БПЛА в среде с преградами показан на рис. 3. На указанных рисунках по горизонтали отложены значения x в метрах, по вертикали – z в метрах. Красным отмечены опорные точки траекторий – узлы графа видимости. БПЛА двигались из крайних левых точек в крайние правые. Недостатком данного алгоритма является высокая вычислительная сложность.



а. Преграды расположены регулярно



б. Преграды произвольной формы, расположенные случайным образом

Рис. 3. Вид сверху на траектории БПЛА в среде с преградами

Уничтожение БПЛА заключается в поражении его огневыми средствами воздействия, дистанционным энергетическим воздействием и т. д. [5, 15]. При этом для уничтожения малого БПЛА достаточно попадания небольшого количества поражающих элементов (ПЭ). Этого оказывается достаточно либо для

повреждения пропеллеров или корпуса с электроникой, либо для нарушения работы системы управления (СУ) БПЛА [25]. В разработанной ИМ учитывается геометрия БПЛА для установления факта попадания по нему.

Существует несколько подходов к моделированию геометрии БПЛА: использование точных или упрощённых трёхмерных моделей; построение его контура и др. Размеры и расположение уязвимых агрегатов (УА) в общем случае зависят от применяемого средства поражения. Модели УА имеют простую геометрическую форму: параллелепипед, цилиндр, конус и т. д. [26]. В данном исследовании речь идёт о достаточно простой цели.

В исследовании [25] модель геометрии цели представлена внешним контуром БПЛА. Критерий поражения: средство поражения (воздействия) должно попасть внутрь контура цели, в противном случае БПЛА не может быть поражён. В отличие от модели УА проверка попаданий по цели в этом случае осуществляется в её картинной плоскости (КП). Это не влияет на адекватность модели, поскольку размеры БПЛА малы, а средство поражения имеет, как правило, высокую скорость, вследствие чего за доли секунды преодолевает сопоставимое с размерами БПЛА расстояние. Если средство воздействия попало в проекцию цели в плоскости, проходящей через её центр масс, то считается, что оно попало и по трёхмерному телу. В изложенном подходе геометрия цели аппроксимируется более точно в сравнении с моделью УА, но имеет следующий серьёзный для текущего исследования недостаток: цель в [25] неподвижна. При моделировании подвижной цели такой подход может привести к значительной вычислительной нагрузке, т. к. придётся часто строить новый контур цели по большому числу точек, достаточно детально описывающих исходную геометрию.

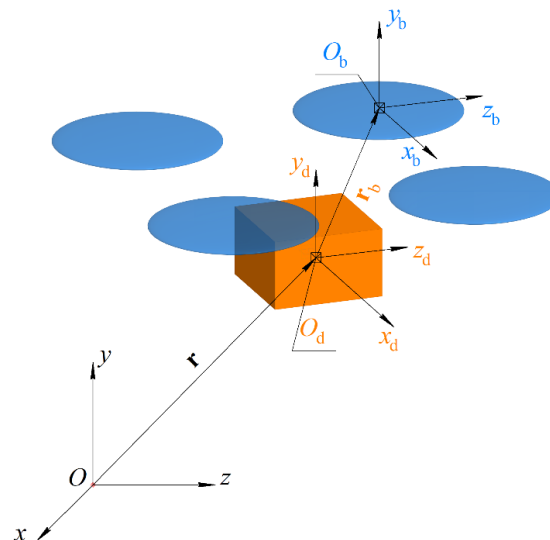


Рис. 4. Геометрия БПЛА, глобальная и локальная системы координат

В разработанной ИМ применяется подход, сочетающий в себе сильные стороны рассмотренных методов и уменьшающий их недостатки. Геометрическая форма БПЛА моделируется набором простых трёхмерных тел. Пример показан на рис. 4, где синим цветом обозначены четыре пропеллера БПЛА (эллипсоиды), а оранжевым – корпус (параллелепипед). При необходимости уста-

новления факта поражения БПЛА строится КП цели, на которую проецируется трёхмерная геометрия. Далее считается, что поражение цели возможно только при попадании средства поражения в получившуюся проекцию. Тем самым обеспечивается упрощение ИМ и её бóльшая вычислительная производительность.

Поскольку в ИМ учитывается геометрия БПЛА, то необходимо иметь возможность рассчитывать ориентацию БПЛА в пространстве в любой момент времени, т. к. размеры и взаимное расположение его частей в проекциях при различных ракурсах могут сильно отличаться. Для обеспечения указанной возможности в граничных точках траектории полёта (точки А и D на рис. 2) ориентация БПЛА задаётся в виде матрицы вращения базисных векторов его локальной системы координат (ЛСК) в глобальном (мировом) базисе. Матрицы начальной и конечной ориентации БПЛА затем используются для сферической интерполяции кватернионов [27] ЛСК БПЛА в любой момент времени [22, 23], что обеспечивает равномерный поворот ЛСК БПЛА из начального положения в точке А в конечное положение в точке В. Математическое выражение для сферической интерполяции кватернионов имеет вид

$$q(\tau) = \frac{\sin[(1-\tau)\gamma]}{\sin\gamma} q_s + \frac{\sin\tau\gamma}{\sin\gamma} q_f,$$

где $q = (\cos(\gamma/2), \mathbf{n}_{ax} \sin(\gamma/2))$ – единичный кватернион поворота ЛСК БПЛА относительно оси с направляющим вектором \mathbf{n}_{ax} ; γ – угол поворота; q_s и q_f – единичные кватернионы начальной и конечной ориентации БПЛА в точках А и D (см. рис. 2) соответственно. Угол поворота ЛСК БПЛА относительно оси с направляющим вектором \mathbf{n}_{ax} по известному интерполированному кватерниону q в случае единичных кватернионов вычисляется следующим образом [22]

$$\gamma = \arccos \frac{q_s \cdot q_f}{\|q_s\| \|q_f\|} \equiv \arccos(q_s \cdot q_f),$$

где оператор « \cdot » обозначает скалярное произведение кватернионов [27].

Таким образом, в ИМ БПЛА движется по гладкой траектории в форме кривой Безье третьего порядка, ориентация осей его ЛСК плавно интерполируется, благодаря чему в любой момент времени возможно получение актуальной проекции БПЛА на КП.

2.2. Имитационная модель БПЛА

Общая модель БПЛА состоит из двух частей: модели БПЛА как физического объекта (т. е. как системы составляющих его тел) и модели СУ. Внешними сигналами для модели БПЛА могут являться сигналы о поражении БПЛА, сигналы об изменении координат точки назначения и др. Модель БПЛА как твёрдого тела представлена на рис. 4: набор трёхмерных тел и их взаимное расположение задаётся в ЛСК $O_d x_d y_d z_d$ БПЛА.

Модель СУ БПЛА представляет собой конечный автомат, состояние которого меняется по той или иной логике при наступлении тех или иных собы-

тий в ИМ. Из схемы конечного автомата, показанной на рис. 5, видно, что ИМ БПЛА имеет четыре возможных состояния: asleep (покоя), operating (работы), finished (успешного завершения полёта) и destroyed (уничтожен в полёте). Команда reset из любого состояния возвращает в состояние по умолчанию – asleep. Внешней по отношению к БПЛА является команда destroy – её выдаёт подсистема поражения в момент поражения цели. Внешней командой также может быть команда operate, запускающая БПЛА, в том случае, если она выдаётся любой другой сущностью, кроме СУ. В разработанной ИМ имеется возможность создания БПЛА, летящих как по заранее заданной траектории, так и по траектории, заранее неизвестной.

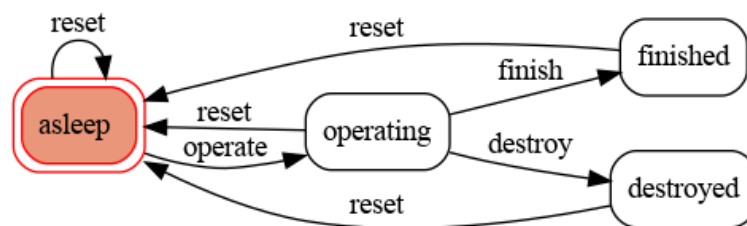


Рис. 5. Схема конечного автомата СУ БПЛА

Модель БПЛА при каждой прогонке ИМ сохраняет в себе координаты и моменты времени своего поражения и падения на землю, тем самым накапливая необходимые статистические данные.

3. Модель подсистемы обнаружения малоразмерных БПЛА

Существуют различные системы обнаружения малоразмерных БПЛА: радиолокационные, оптико-электронные (ОЭС), акустические, лазерные и др. [20-30]. Наибольшее распространение ввиду своей универсальности и надёжности получили РЛС [31], ОЭС и комбинированные системы. Стоит отметить, что применение РЛС в городе несколько затруднительно ввиду следующих причин:

- дифракция и переотражения радиолокационных лучей;
- отражение сантиметровых и миллиметровых лучей от птиц;
- электромагнитная зашумленность городов в случае использования пассивных РЛС и т. д.

3.1 Модель радиолокационной антенны

Антенна РЛС имеет следующие параметры, определяющие её зону обзора (см. рис. 6):

- начальный азимут антенны $\varphi_{a0} = \varphi_a(t=0)$;
- угол обзора антенны по азимуту $\Delta\varphi$ в пределах $[0; 2\pi)$ (в режиме полного обзора параметр $\Delta\varphi = 2\pi$ роли не играет);
- диапазон угла места антенны от θ_{a0} до θ_{a1} в пределах от $-\pi/2$ до $\pi/2$;

– минимальная R_{\min} и максимальная R_{\max} дальность действия антенны.

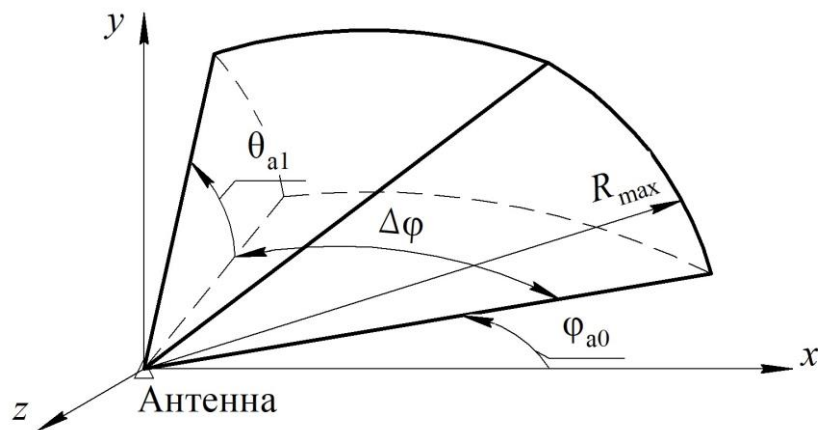


Рис. 6. Зона обзора антенны

Объект (цель) может быть обнаружен, только если он находится в зоне обзора антенны РЛС, чему соответствуют нижеприведённые условия:

- 1) $\varphi_a(0) < \varphi < \varphi_a(0) + \Delta\varphi$ – условие нахождения объекта в зоне обзора по азимуту, где φ – азимут цели в полярной системе координат антенны; $\varphi_a(0)$ – начальный азимут антенны;
- 2) $\theta_{a0} < \theta_t < \theta_{al}$ – условие нахождения объекта в зоне обзора по углу места, где θ_t – угол места цели;
- 3) $R_{\min} < R_t < R_{\max}$ — условие нахождения объекта в зоне обзора по расстоянию до него от станции обзора, где R_t – расстояние до цели.

Если не удовлетворяется хотя бы одно из условий, то объект не может быть обнаружен. Алгоритм обнаружителя в этом случае либо не выполняется, либо генерирует случайное событие «обнаружение цели», тем самым имитируется возникновение ложного обнаружения.

На рис. 7 приведена расчётная схема определения временного интервала, когда БПЛА находится в зоне действия антенны. Траектория БПЛА описывается радиус-вектором $\mathbf{r}(t)$ при $t \in [t_s; t_f]$, где t_s и t_f — моменты времени начала и конца полёта БПЛА. Координаты антенны задаются постоянным радиус-вектором \mathbf{r}_r .

Границы временного интервала t_{in} и t_{out} нахождения цели в зоне обзора РЛС являются корнями уравнения $R_{\max}^2 = (\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_r)^2$, в котором \mathbf{r}_r – радиус-вектор радарной антенны. Максимальная дальность может быть оценена по упрощённой основной формуле радиолокации [32]:

$$R_{\max} = R_{\text{ref}} \sqrt[4]{S_{\sigma d} / S_{\sigma \text{ref}}},$$

где R_{ref} – максимальная дальность обнаружения эталонной цели с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) $S_{\sigma \text{ref}}$; $S_{\sigma d}$ – ЭПР БПЛА.

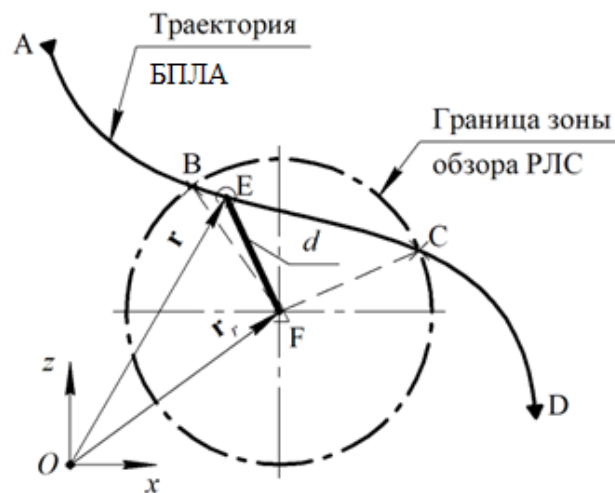


Рис. 7. К расчёту времени нахождения цели в зоне обзора РЛС

Предполагается, что антенна РЛС вращается с постоянной угловой скоростью ω_a , начиная вращение с заданного азимута φ_0 . Азимут антенны в любой момент времени определяется функцией $\varphi_a(t) = \varphi_a(0) + \omega_a t$. Момент времени t_{beam} , когда антенна направлена на цель в азимутальной плоскости, является корнем уравнения, в полярной системе координат имеющего вид

$$\varphi_a(t) = \varphi_a(0) + \omega_a t = \varphi(t) = \arctan[z(t)/x(t)], \quad (2)$$

где x и z – декартовы координаты БПЛА в горизонтальной плоскости. Уравнение (2) решается численно в границах времени $t \in [t_{\text{in}}; t_{\text{out}}]$ и в общем случае ввиду своей периодичности может иметь несколько корней в указанном интервале. Для обеспечения однозначного и последовательного нахождения корней при компьютерном моделировании все углы приводятся к интервалу $[0; 2\pi)$. Корни ищутся последовательно в каждом круге вращения антенны. По рассчитанному таким образом моменту времени t_{beam} определяются координаты цели $\mathbf{r}(t_{\text{beam}})$ и вектор линии визирования «антенна – цель»: $\mathbf{r}_{\text{a vis}} = \mathbf{r}(t_{\text{beam}}) - \mathbf{r}_r$.

3.2. Модель радиолокационного обнаружителя

Обнаружитель характеризуется величинами вероятности ложной тревоги P_{FA} и вероятности правильного обнаружения P_{CD} . Выходное напряжение обнаружителя U_D генерируется как случайная величина, распределённая по нормальному закону со средним μ_{sig} и среднее квадратическое отклонение (СКО) σ_{sig} : $U_D \sim N(\mu_{\text{sig}}, \sigma_{\text{sig}}^2)$. Если $U_D > U_T$, где U_T – величина порогового значения принятия решения об обнаружении, то с учётом вероятности P_{CD} принимается решение об обнаружении объекта, его координаты и скорость считаются измеренными. В противном случае цель считается пропущенной.

Помимо сигнала от цели на входе приёмника всегда присутствуют помехи, которые моделируются как гауссовский белый шум [32]. При отсутствии полезного сигнала на входе приёмника обнаружителя величина выходного напряжения распределена по нормальному закону $U_{\text{noise}} \sim N(0, \sigma_{\text{noise}})$, где σ_{noise} –

СКО напряжения при отсутствии полезного сигнала на входе приёмника. На рис. 8 схематично показаны функции плотности вероятности распределения выходных напряжений обнаружителя в отсутствие полезного сигнала (кривая p_0) и при его наличии (кривая p_1) [32]. Величина порогового значения напряжения U_T определяется по критерию Неймана – Пирсона, исходя из заданного уровня вероятности ложной тревоги. Как правило, P_{FA} имеет порядок $10^{-2} \dots 10^{-8}$, P_{CD} принимается равной примерно 0,9 [33].

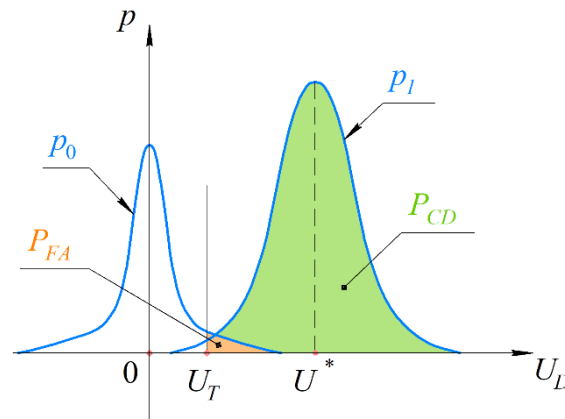


Рис. 8. К определению критерия обнаружения

В разработанной ИМ учитывается, что каждый объект должен быть обнаружен N_{obs} раз подряд, что необходимо для захвата его траектории и выдачи результатов системе поражения. Если в процессе обзора уже обнаруженная цель не была обнаружена N_{lost} раз подряд, то считается, что произошёл срыв сопровождения – цель теряется, алгоритм её обнаружения начинается заново [32, 33].

3.3. Имитационная модель подсистемы обнаружения

В ИМ РЛС входят модели антенн и модель обнаружителя. Модель радара осуществляет взаимодействие между антеннами и обнаружителем: последнему передаётся первичная радиолокационная информация с антенн, т. е. информация об ориентации антенны и дальности принятого отражённого сигнала. Схема ИМ радара приведена на рис. 9. На выходе ИМ РЛС выдаёт метки обнаруженных целей в виде измеренных координат, которые в общем случае не совпадают с действительными координатами БПЛА ввиду наличия ошибок в радарной системе, и скорости целей, если такие ошибки при моделировании учитываются. В разработанной ИМ возможно реализовать ограничение на число одновременно отслеживаемых целей.

При моделировании процесса обнаружения цели заносятся в список, который «прослушивается» моделью системы поражения: когда в пустом списке появляется первая цель, происходит автоматический запуск подсистемы нейтрализации, если она не запущена. В дальнейшем эта подсистема получает информацию о целях из указанного списка обнаруженных объектов.

В ИМ радара аккумулируются такие данные, как метки обнаружений: моменты времени обнаружения целей, координаты и скорости обнаруженных БПЛА, число выведенных из строя антенн и пр.

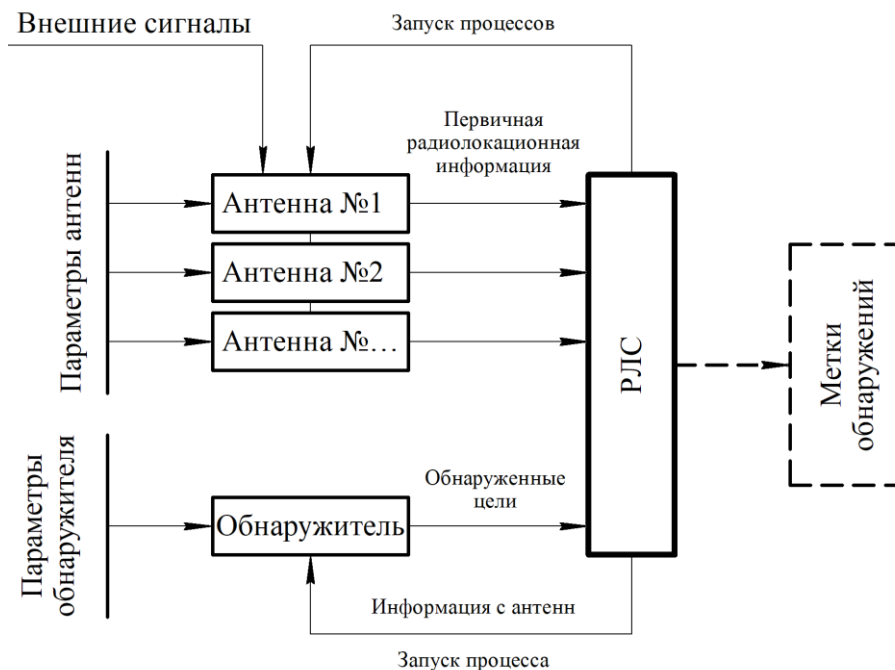


Рис. 9. Схема ИМ РЛС

4. Модель подсистемы нейтрализации малоразмерных БПЛА

В данном разделе описана модель средства противодействия, оказывающего огневое воздействие на БПЛА посредством пуль, дроби и др. В модели введено допущение, что объекты критической (энергетической, логистической и др.) инфраструктуры достаточно удалены либо обособлены от населённых районов города. В подобных условиях огневое противодействие БПЛА может быть безопасным для окружающей инфраструктуры и людей.

В модели стрельбы в общем случае учитываются ошибка прицеливания, двоецентрие автоматического оружия и отклонение средств поражения на траектории [34]. Полная схема ошибок стрельбы показана на рис. 10. Ошибки стрельбы распределены по двумерному нормальному закону, функция плотности вероятности которого в общем случае имеет вид

$$\rho(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_h) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\det \boldsymbol{\Sigma}_h}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}_h^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right], \quad (3)$$

где \mathbf{x} – радиус-вектор генерируемой случайной точки в КП: $\mathbf{x} = [x \quad y]^T$; $\boldsymbol{\mu}$ – вектор математического ожидания для случайной точки в КП: $\boldsymbol{\mu} = [\mu_x \quad \mu_y]^T$; $\boldsymbol{\Sigma}_h$ – ковариационная матрица нормального распределения при дальности до цели h :

$$\Sigma_h = \frac{h}{h_0} \cdot \Sigma = \frac{h}{h_0} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix};$$

σ_x и σ_y – СКО по осям картинной плоскости на опорной дальности h_0 ; σ_{xy} отражает корреляцию рассеяния точек попаданий по осям КП: при $\sigma_{xy} = 0$ м отклонения по осям КП не зависят друг от друга.

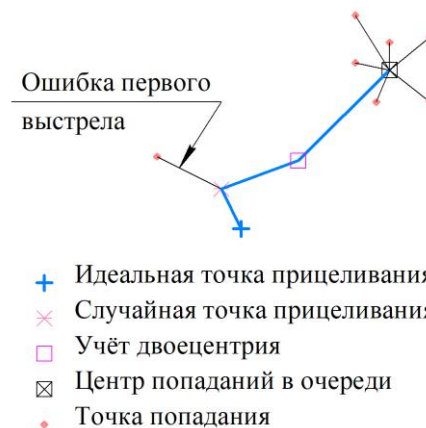


Рис. 10. Общая схема ошибок стрельбы

Возможно моделирование стрельбы одиночными или очередью. Также учитывается скорострельность, ёмкость магазина (ленты), время между очередями, время между выстрелами в одной очереди, время перезарядки, средняя скорость передвижения средства противодействия в пространстве, если это средство имеет возможность перемещаться.

4.1. Картинная плоскость и проекция цели на неё

Попаданием по цели считается попадание ПЭ в её проекцию на КП. Картинной является плоскость, проходящая через центр масс БПЛА, с единичным вектором нормали \mathbf{n}_{pp} , ориентация которого зависит от используемого средства поражения. Соответствующий орт КП есть $\mathbf{k}_{pp} = \mathbf{n}_{pp} / \|\mathbf{n}_{pp}\|$. Вектор \mathbf{n}_{pp} является направляющим вектором оси $O_{pp}z_{pp}$ КП. Орт \mathbf{i}_{pp} оси $O_{pp}x_{pp}$ всегда горизонтален. Орт \mathbf{j}_{pp} оси $O_{pp}y_{pp}$ дополняет систему до правой тройки векторов. Этим обеспечивается возможность преобразования координат из глобальной системы (ГСК) в систему координат КП.

В разработанной ИМ имеется возможность расчёта проекций трёхмерных тел, описываемых квадратическими уравнениями, или произвольных тел, заданных как множество точек. Алгоритм расчёта проекций можно найти, например, в книге [23]. Его суть сводится к построению базиса КП и либо преобразованию радиус-векторов точек к сформированному базису (для тел, заданных множеством точек), либо к проектированию и масштабированию осей гладких тел (например, эллипсоида) на КП.

Расчёт проекции на КП, например, эллипсоида происходит следующим образом. Коника C плоской проекции трёхмерного тела, заданного канонической квадратикой Q , может быть найдена из матричного уравнения

$$C^* = PQ^*P^T, \quad (4)$$

где P – проектор; C^* и Q^* – двойные коника и квадратика соответственно.

Если Q^* симметрична, то симметрична и C^* [23], и уравнение (4) можно записать в виде

$$C = (PQ^{-1}P^T)^{-1}. \quad (5)$$

Каноническое уравнение эллипсоида с центром в начале координат и полуосями a , b и c в матричном представлении имеет вид

$$\mathbf{x}_0^T \begin{bmatrix} Q_{s0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_0^T Q_0 \mathbf{x}_0 = 0,$$

где $\mathbf{x}_0 = [x_{01} \ x_{02} \ x_{03} \ 1]^T$ – радиус-вектор точки в базисе эллипсоида; Q_0 – каноническая диагональная квадратика в собственном базисе эллипсоида; Q_{s0} – диагональная матрица:

$$Q_{s0} = \text{diag}(a^{-2}, b^{-2}, c^{-2}). \quad (6)$$

При повороте осей эллипсоида, т. к. оси ЛСК БПЛА в процессе полёта меняют ориентацию, матрица (6) перестаёт быть диагональной, но сохраняет симметричность, поскольку матрица поворота ортогональна. Также легко заметить, что Q_{s0} по сути своей является матрицей, масштабирующей некоторый вектор вдоль осей эллипсоида, которые являются координатными осями связанной с эллипсоидом системы координат. Указанные факты позволяют реализовать следующий алгоритм расчёта проекции:

- 1) пересчитать Q_{s0} в оператор Q_{spp} того же масштабирующего преобразования, но в базисе КП;
- 2) составить квадратик Q_{pp} эллипсоида в базисе КП;
- 3) рассчитать конику C_{pp} по формуле (5) с заменой Q на Q_{pp} ;
- 4) пересчитать радиус-вектор центра масс тела \mathbf{r}_{loc} в базисе системы отчёта БПЛА в радиус-вектор \mathbf{r}_{pp} в базисе КП;
- 5) с использованием полученных C_{pp} и \mathbf{r}_{pp} выполнить аффинное преобразование единичной окружности с центром в начале координат КП в эллипс, соответствующий проекции эллипсоида.

На рис. 11: $Oxyz$ – ГСК; $\mathbf{r}_{vis} = \mathbf{r}_C - \mathbf{r}_A$ – вектор линии визирования, где \mathbf{r}_C и \mathbf{r}_A – радиус-векторы соответствующих точек в ГСК. В качестве КП выступает плоскость, перпендикулярная линии визирования и касательная к эллипсоиду в точке O_{pp} . В этом случае вектор нормали КП $\mathbf{n}_{pp} = -\mathbf{r}_{vis}$. Орты базиса КП \mathbf{i}_{pp} , \mathbf{j}_{pp} и \mathbf{k}_{pp} рассчитываются в зависимости от типа средства поражения.

Матрица перехода от ортонормированного базиса ζ_{pp} КП в базис ГСК $\zeta = (\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$, где $\mathbf{i} = [1 \ 0 \ 0]^T$ м, $\mathbf{j} = [0 \ 1 \ 0]^T$ м и $\mathbf{k} = [0 \ 0 \ 1]^T$ м, имеет вид

$$M_{\zeta_{pp} \rightarrow \zeta} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{pp} & \mathbf{j}_{pp} & \mathbf{k}_{pp} \end{bmatrix}_{3 \times 3}. \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_{\text{ellips}} = \mathbf{r} + \mathbf{R}_{\text{loc}} \mathbf{r}_{\text{loc}}, \quad (10)$$

где \mathbf{r}_{loc} – радиус-вектор центра масс тела в ЛСК БПЛА; \mathbf{r} – радиус-вектор центра масс БПЛА в ГСК.

Тогда радиус-вектор центра масс тела в базисе ζ_{pp} с учётом (8) и (10)

$$\mathbf{r}_{\text{pp}} = \mathbf{R}_{\text{pp}} (\mathbf{r}_{\text{ellips}} - \mathbf{r}). \quad (11)$$

Матрица собственного аффинного преобразования базиса КП

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}_0 \mathbf{D}_0, \quad (12)$$

где \mathbf{U}_0 – ортогональная матрица единичных собственных векторов \mathbf{A}_0 ; $\mathbf{D}_0 = \text{diag}(1/\sqrt{\lambda_{01}}, 1/\sqrt{\lambda_{02}})$ – диагональная матрица; λ_{01} и λ_{02} – собственные числа преобразования \mathbf{A}_0 ; $\mathbf{A}_0 = [\mathbf{C}_{\text{pp}i,j}]_{\substack{i=1,2 \\ j=1,2}}$.

Как известно, собственные числа симметричной положительно определённой матрицы вещественны и положительны [23]. Матрица \mathbf{A}_0 – симметричная и положительно определённая, так как получена из симметричной матрицы преобразованиями, также описываемыми симметричными матрицами. Из определения собственных чисел и собственных векторов матрицы следует, что λ_{01} и λ_{02} являются коэффициентами масштабирования по осям, задаваемых соответствующими собственными векторами. При этом необходимо помнить, что изначальная матрица (6) содержит в себе коэффициенты эллипсоида в виде a^{-2} , b^{-2} и c^{-2} , поэтому действительные коэффициенты масштабирования по осям $O_{\text{pp}}x_{\text{pp}}$ и $O_{\text{pp}}y_{\text{pp}}$ картинной плоскости равны соответственно $1/\sqrt{\lambda_{01}}$ и $1/\sqrt{\lambda_{02}}$.

Матрица (12) представляет собой матрицу линейного преобразования единичной окружности с центром в начале координат КП в эллипс проекции эллипсоида с тем же центром. Сместив центр проекции на вектор $\Delta \mathbf{r}$, состоящий из первых двух координат вектора (11), получим действительную проекцию эллипсоида. Итоговый оператор аффинного преобразования

$$\mathbf{A}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \Delta \mathbf{r} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

и само аффинное преобразование в однородных координатах КП

$$\mathbf{f}_{ab}(x, y) = \mathbf{A}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \Delta \mathbf{r} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} [x \quad y \quad 1]^T. \quad (13)$$

Подставляя координаты точек единичной окружности с центром в начале координат КП в (13), получаем проекцию трёхмерного тела. Расчёт проекций других трёхмерных тел, имеющих невырожденные диагональные квадратики, полностью аналогичен изложенному алгоритму.

В случае, если тело негладкое, к примеру параллелепипед, то оно задаётся точками в ЛСК БПЛА. Контур проекции тела на КП получается путём матричных преобразований координат точек с последующим построением охватывающего контура спроецированных точек. Базис КП строится так же, как описано выше. По формулам (7), (8) и (11) рассчитываются матрица перехода

$M_{\zeta_{pp} \rightarrow \zeta}$ из базиса КП в базис ГСК, матрица ориентации R_{pp} осей тела в КП и радиус-вектор r_{pp} центра масс тела в координатах базиса КП соответственно. Оператор преобразования координат точек тела в их координаты на плоскости в этом случае

$$A_p = \begin{bmatrix} [R_{pp}^{i,j}]_{\substack{i=1,2 \\ j=1,2}} & [r_{ppi}]_{i=1,2} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3},$$

аффинное преобразование в однородных координатах $f_{ap}(x, y) = A_p [x \ y \ 1]^T$.

4.2. Алгоритм стрельбы

1. Моделью баллистического вычислителя рассчитывается «идеальная» точка прицеливания в КП. Баллистический вычислитель может быть реализован как модель машинного или глубокого обучения.
2. В КП генерируется случайная точка прицеливания.
3. В КП генерируется случайная точка первого выстрела.

В случае стрельбы одиночными пункты 1-3 повторяются, в ином случае алгоритм продолжается в следующей последовательности.

4. В КП согласно рис. 10 генерируется средняя точка попаданий (СТП) выстрелов очереди.
5. В КП генерируются случайные точки попаданий средств поражения относительно СТП.

Все случайные точки генерируются согласно (3) при соответствующих параметрах. Прицеливание производится перед каждой очередью. Во время стрельбы очередью точка прицеливания не меняется.

Время Δt_s между выстрелами одной очереди – величина постоянная. Время же между очередями Δt_b есть величина случайная, подчиняющаяся экспоненциальному закону распределения [35] с функцией плотности вероятности вида

$$\rho_b(\Delta t_b) = \frac{1}{\beta_b} \exp\left(-\frac{\Delta t_b}{\beta_b}\right),$$

где β_b – среднее время между очередями. В случае стрельбы одиночными параметр β_b характеризует среднее время между отдельными выстрелами.

При каждом выстреле проверяется условие необходимости перезарядки. Время перезарядки Δt_r может быть как заданной, так и случайной величиной, подчиняющейся тому или иному закону распределения.

4.3. Модели средств поражения со множеством поражающих элементов

Для повышения эффективности стрельбы по малоразмерным БПЛА перспективным считается применение программируемых средств поражения со множеством ПЭ, например, резиновых дробинок. Задержка срабатывания запи-

сывается в снаряд в момент выстрела. Величина времени задержки зависит от измеренной дальности до цели в момент выстрела.

Ввиду большого числа ПЭ (десятки и сотни) алгоритм, рассчитывающий траекторию каждого осколка, оказывается крайне неэффективным. В качестве решения этой проблемы сформулирован координатный закон поражения (КЗП) БПЛА средствами воздействия с готовыми ПЭ.

Пусть G есть функция КЗП. В ИМ принято допущение, что для поражения БПЛА достаточно хотя бы одного попадания. В таком случае вероятность поражения цели при срабатывании боеприпаса (БП) совпадает с функцией КЗП.

Для формирования функции КЗП в случае БП с осевым разлётом ПЭ (аксиального БП) обратимся к схемам на рис. 12 и рис. 13. Картичная плоскость строится по нормали к оси снаряда в момент его срабатывания. По этой причине в КП сечением осколочного поля всегда будет круг. Тогда в системе координат КП $O_{pp}x_{pp}y_{pp}z_{pp}$ (точка O_{pp} совпадает с центром масс цели) КЗП имеет следующий вид:

$$P_{hit\ ax} = G_{ax} = \begin{cases} 1, & \text{если } r_{act} \leq r_0, \\ 0, & \text{если } r_{act} > r_0 \wedge A \notin Z^*, \\ \bar{r} \cos \theta, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (14)$$

где \bar{r} – коэффициент учёта дальности до цели от точки срабатывания БП:

$$\bar{r} = \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{1}{k_f} \frac{r_{act} - s}{r_0} \right) \right]; \quad (15)$$

r_0 – радиус безусловной зоны поражения цели; k_f – коэффициент, учитывающий количество ПЭ (коэффициент мощности действия БП): $k_f \in \mathbb{R} > 0$; θ – угол между векторами \mathbf{r}_{act} и \mathbf{v}_1 , $\theta \in [-\pi/2; \pi/2]$:

$$\cos \theta = -\frac{\mathbf{r}_{act} \cdot \mathbf{v}_1}{r_{act} v_1}; \quad (16)$$

\mathbf{r}_{act} и r_{act} – радиус-вектор центра масс снаряда в системе координат КП в момент срабатывания БП и расстояние до БП от точки O_{pp} соответственно; \mathbf{v}_1 и v_1 – вектор скорости средства поражения в момент его срабатывания и величина этого вектора соответственно; Z^* – минимальный прямоугольник, описанный вокруг проекции цели Z , расширенный на величину Δr_z – радиус основания конуса поля ПЭ:

$$\Delta r_z = \frac{|\mathbf{r}_{act} \cdot \mathbf{v}_1|}{\sin \frac{\alpha_p}{2}};$$

α_p – угол раствора конуса осколочного поля снаряда; A – точка пересечения луча, направленного по \mathbf{v}_1 , с КП (см. рис. 12); s – величина смещения, обеспечивающая единичное значение третьего выражения в системе (14) при $r_{act} = r_0$:

$$s = r_0 \cdot \left[1 + k_f \ln(e - 1) \right].$$

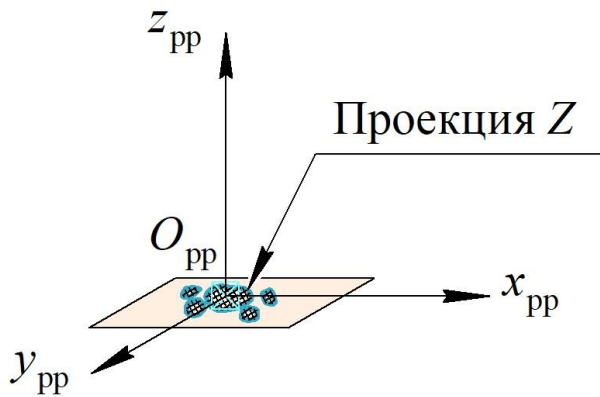


Рис. 12. Картинная плоскость

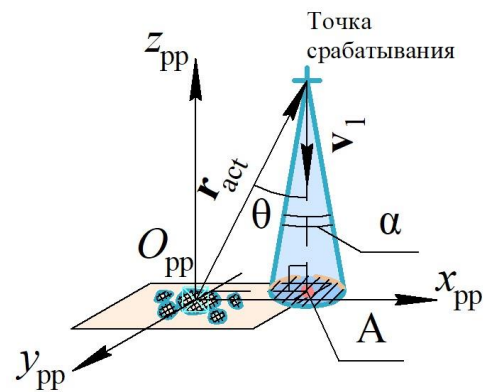


Рис. 13. К определению КЗП в случае БП с осевым разлётом ПЭ

Для поражения БПЛА в плотной группе эффективным может оказаться БП с радиальным разлётом ПЭ. В этом случае КП цели строится по вектору нормали \mathbf{n}_{rad} , определённого следующим образом:

$$\mathbf{n}_{\text{rad}} = \frac{\mathbf{v}_1 \times (\mathbf{r}_{\text{act}} \times \mathbf{v}_1)}{\|\mathbf{v}_1 \times (\mathbf{r}_{\text{act}} \times \mathbf{v}_1)\|}.$$

Расчётная схема представлена на рис. 14. В координатах КП

$$P_{\text{hit rad}} = G_{\text{rad}} = \begin{cases} 1, & \text{если } r_{\text{act}} \leq r_0, \\ 0, & \text{если } r_{\text{act}} > r_0 \wedge (\theta < \varphi_{p1} \vee \theta > \varphi_{p2}), \\ \bar{r} \cdot \bar{d} \cdot \bar{s} \cdot \bar{a}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (17)$$

где \bar{d} – коэффициент учёта ориентации снаряда относительно цели в момент его срабатывания:

$$\bar{d} = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left[\frac{\pi}{\Delta\varphi_p} (\theta - \bar{\varphi}_p) \right] \right);$$

$\Delta\varphi_p = \varphi_{p2} - \varphi_{p1}$ – угол поля разлёта ПЭ; $\bar{\varphi}_p = (\varphi_{p1} + \varphi_{p2})/2$ – средний угол поля ПЭ; $\bar{s} = S_Z/S_{\text{rect}}$ – коэффициент учёта площади проекции цели; S_Z и S_{rect} – площади проекций Z и Z_{rect} цели соответственно; Z_{rect} – это минимальный прямоугольник, описанный вокруг проекции Z ; \bar{a} – коэффициент, характеризующий влияние смещения поля ПЭ в динамике [36]:

$$\bar{a} = 4 \left(\frac{\theta}{\pi} - 1 \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\theta}{\pi} - 1 \right)^2 \right].$$

Величины \bar{r} и θ вычисляются по формулам (15) и (16) соответственно, но для системы (17) $\theta \in [0; \pi]$.

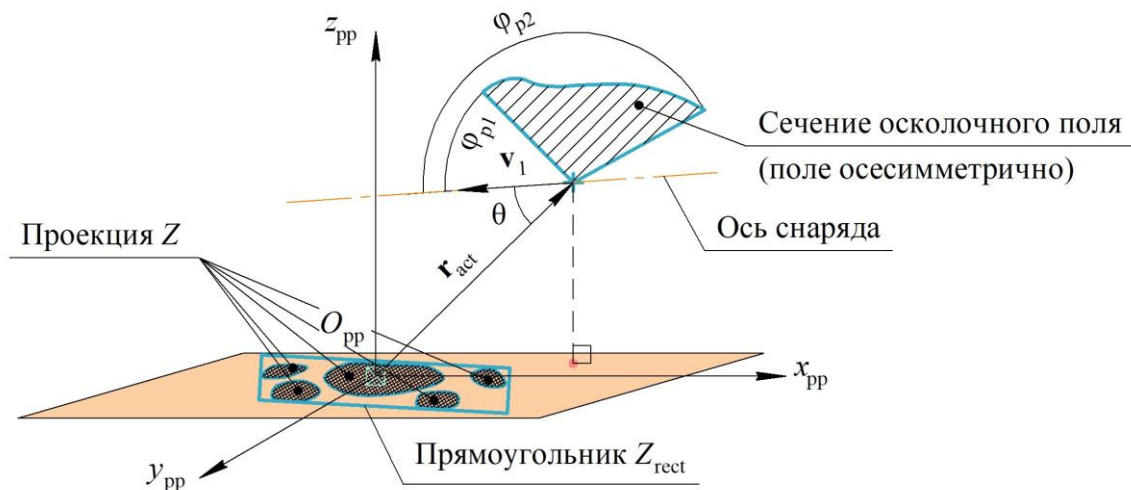


Рис. 14. К определению КЗП в случае БП с радиальным разлётом ПЭ

На рис. 15 показаны графики функций (14) и (17) в зависимости от угла θ и расстояния r_{act} между точкой срабатывания СВ и центром масс БПЛА. Оба графика получены при $k_f = 4$, $r_0 = 5$ м. Дополнительные параметры правого графика ($P_{hit rad}$): $\varphi_{p1} = 20^\circ$, $\varphi_{p2} = 120^\circ$.

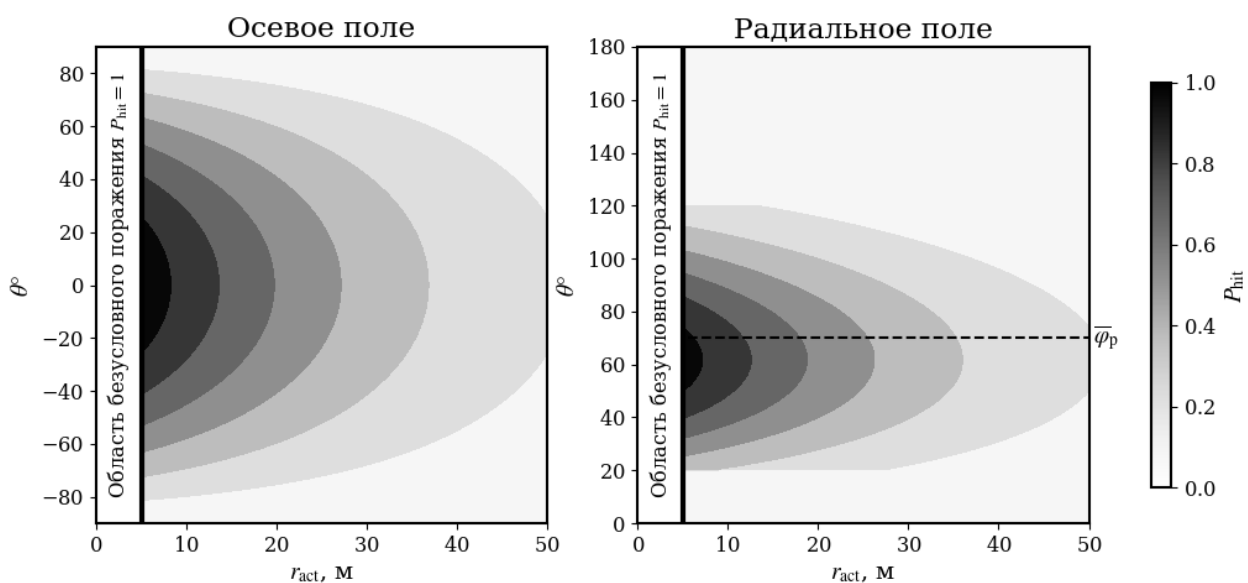


Рис. 15. Зависимости $P_{hit ax}$ и $P_{hit rad}$ от расстояния до цели и ориентации БП относительно цели в момент его срабатывания

4.4. Модель падения БПЛА

Имитационная модель позволяет проводить оценку эффективности системы поражения, в частности, по критерию количества БПЛА, упавших в запретные (охраняемые) зоны. В связи с этим возникает необходимость реализации модели падения БПЛА на поверхность земли. Для расчёта траектории падения задаётся зависимость лобового сопротивления от скорости v и массы m_d БПЛА. Падение БПЛА описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (см. расчётную схему на рис. 16)

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{g} - \frac{F_{\text{drag}}(v^*)}{m_d} \cdot \frac{\mathbf{v}^*}{v^*}, \quad (18)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор центра масс БПЛА; $\mathbf{g} = [0 \quad -9,81 \quad 0]^T$ м/с² – вектор ускорения свободного падения; $F_{\text{drag}}(v)$ – заданная функция лобового сопротивления БПЛА; \mathbf{v}^* и v^* – вектор и величина скорости БПЛА с учётом импульса, полученного от соударения с ПЭ, соответственно:

$$\mathbf{v}^* = \frac{m_d \mathbf{v} + m_p \mathbf{v}_p}{k_p m_d};$$

m_p – масса ПЭ; \mathbf{v}_p – вектор скорости ПЭ в момент встречи с целью; k_p – коэффициент передачи импульса: $k_p \in [0; 1]$. Путём интегрирования уравнения (18) в заданном интервале времени при известных начальных условиях определяется радиус-вектор точки падения БПЛА \mathbf{r}_{fall} с учётом ландшафта. Затем устанавливается факт попадания этой точки в защищаемую зону.

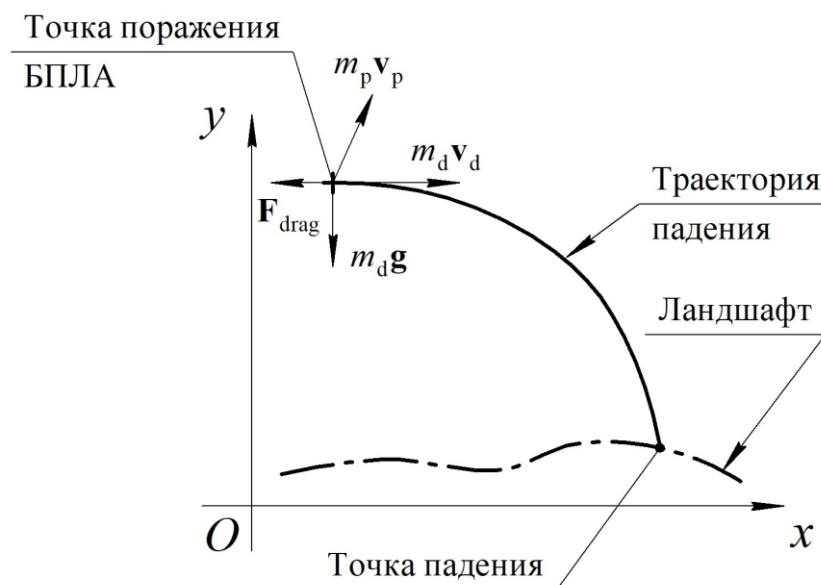


Рис. 16. Расчётная схема падения БПЛА

4.5. Имитационная модель подсистемы нейтрализации

Подсистема нейтрализации (поражения) состоит из нескольких средств воздействия (см. рис. 17). Основная функция подсистемы нейтрализации – распределение целей между средствами воздействия.

Модель средства воздействия основана на конечном автомате, схема которого показана на рис. 18. Как видно, каждое средство воздействия может находиться в пяти состояниях: asleep (состояние покоя), eliminating (функционирует, распределяет цели), shooting (ведёт огонь по цели), reloading (перезаряжается) и moving (перемещается на новую позицию). В состояние по умолчанию (в состояние asleep) из любого другого состояние переводит команда reset, которая в программной реализации ИМ вызывается при каждой новой итерации

моделирования в основном цикле. Каждое средство воздействия обладает собственной СУ, системой наведения (прицеливания), алгоритм работы которой зависит от типа используемого БП. Команда move2 генерируется моделью СУ средством воздействия. При отсутствии целей в списке обнаружений системы обнаружения команда sleep переводит активную систему противодействия БПЛА в состояние простоя asleep.

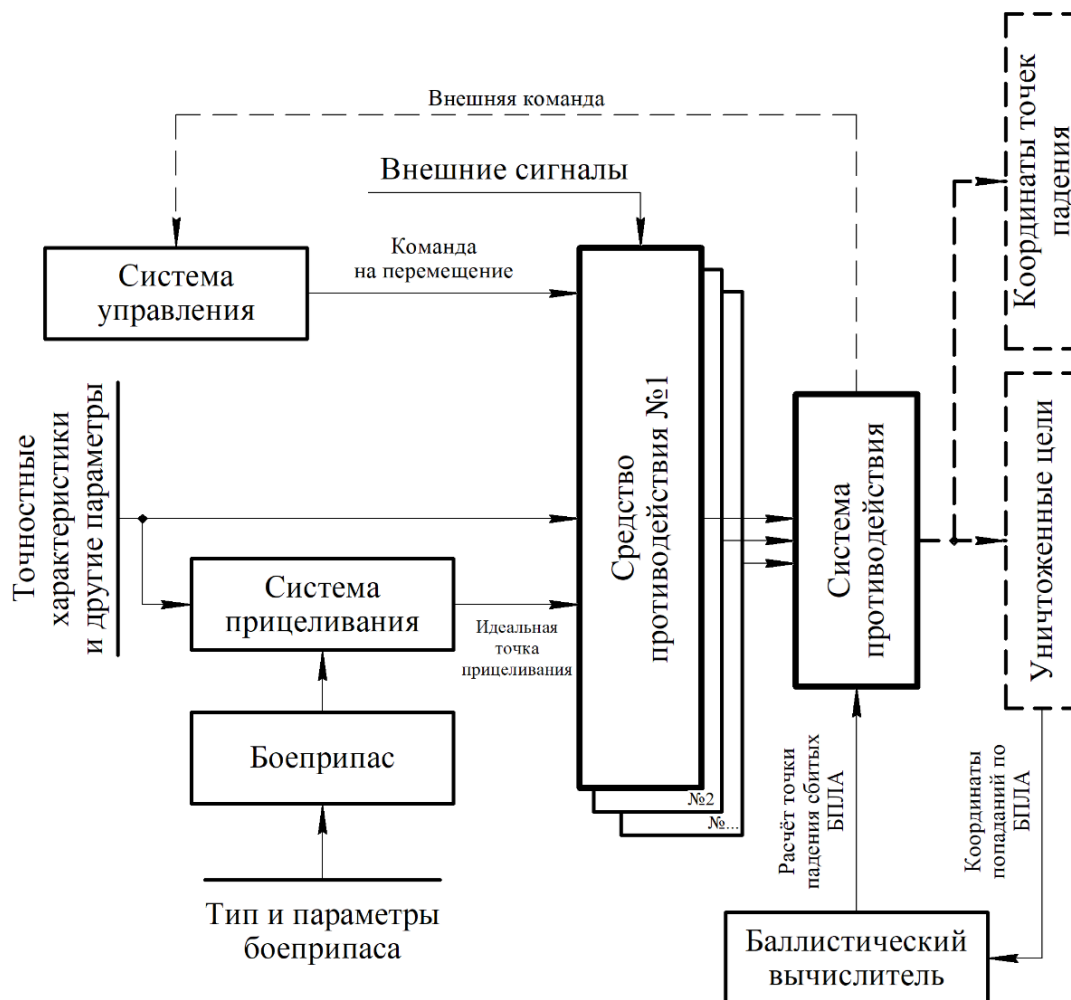


Рис. 17. Схема ИМ подсистемы нейтрализации БПЛА

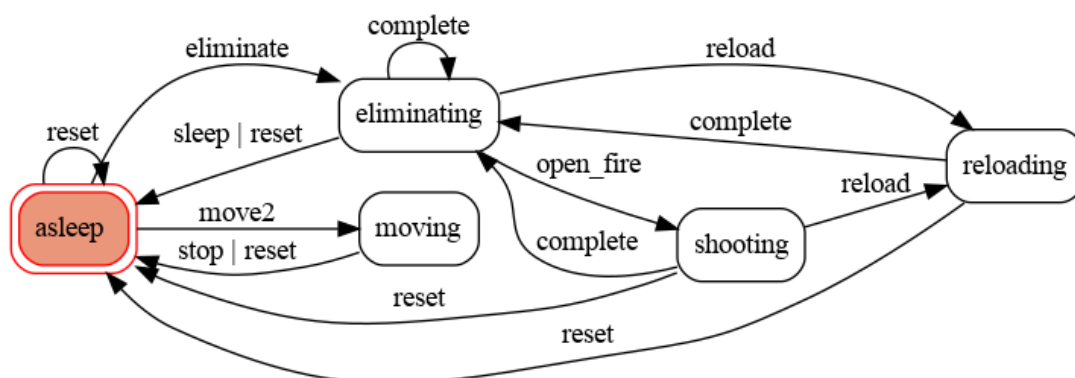


Рис. 18. Подсистема нейтрализации БПЛА как конечный автомат

5. Критерии эффективности системы поражения БПЛА

Большинство критериев сформулировано в теории эффективности стрельбы [34], остальные сформированы вновь, среди них вероятность и интенсивность уничтожения малоразмерных БПЛА и вероятность и интенсивность их падения в запретные зоны.

Имитационная модель в течение N_{run} прогонок накапливает следующую статистику:

- расход СВ N_a на выполнение задачи противодействия;
- время моделирования T – время, за которое либо уничтожены все цели, либо уцелевшие БПЛА достигли своей цели;
- координаты точек попаданий по БПЛА с метками времени;
- координаты точек падения сбитых БПЛА с проверкой их попадания в охраняемые зоны с метками времени;
- координаты обнаруженных радаром целей с метками времени.

При последующей обработке статистики:

- рассчитываются доверительные интервалы для N_a и T ;
- рассчитывается вероятность поражения всех БПЛА;
- рассчитывается вероятность падения БПЛА в охраняемые области;
- определяется среднее время падения сбитых БПЛА в свободную область и в охраняемые зоны.

Вероятность поражения цели, расход БП и время выполнения задачи противодействия – основные критерии оценки эффективности системы поражения БПЛА.

Графически строятся:

- двумерные гистограммы плотности точек падения БПЛА – число объектов в области пространства, отнесённое к площади всего поля гистограммы;
- двумерные гистограммы плотности точек обнаружения РЛС целей;
- диаграммы рассеяния для N_a и T ;
- гистограмма доли уничтоженных БПЛА;
- гистограмма доли БПЛА, упавших в запретные зоны;
- гистограммы интенсивности уничтожения и падения БПЛА, в т. ч. в охраняемые зоны.

Гистограммы интенсивности строятся по меткам времени соответствующих событий (поражение, падение БПЛА и т. п.). По горизонтальной оси откладывается относительная величина времени $\tau = T_i / T_{\text{max}} \in [0; 1]$, где T_{max} – максимальное время моделирования по всем N_{run} прогонам:

$$T_{\text{max}} = \max_{i=1, N_{\text{run}}} (T_i). \quad (19)$$

На рис. 19 показана схема системы поражения БПЛА, состоящей из четырёх средств огневого поражения и трёх антенн РЛС. Также показано пять защищаемых зон, которые в общем случае могут иметь произвольную форму.

Минимум доли упавших в эти области БПЛА может служить одним из критериев эффективности системы противодействия БПЛА.

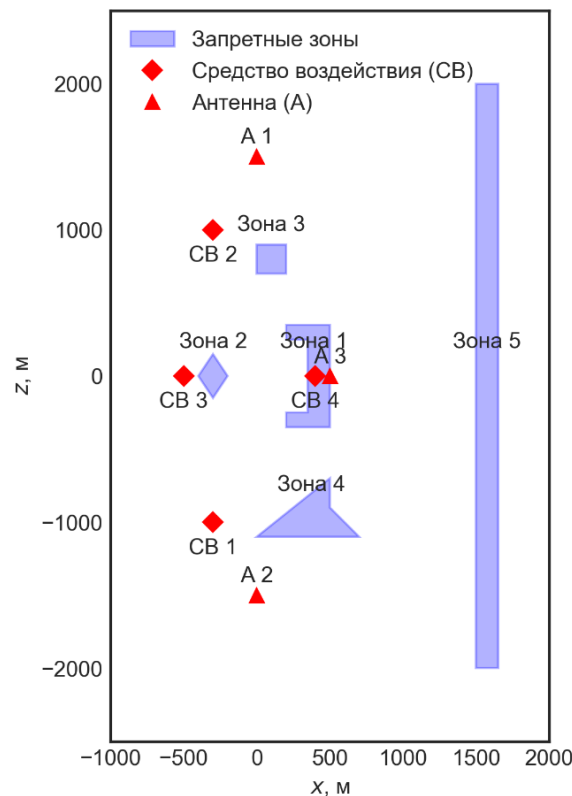


Рис. 19. Вид сверху на систему поражения БПЛА

На следующих далее рисунках показаны результаты моделирования при различном числе одновременно налетающих БПЛА N_d , которые в каждом случае летели слева от $x_{left} = -1500$ м направо до $x_{right} = 1500$ м с шириной по фронту 4000 м, симметричной относительно прямой $z = 0$, на высоте от 50 м до 150 м. Основные параметры моделирования приведены в таблицах 3–6.

Таблица 3 – Основные параметры средств противодействия

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Общие характеристики			
Ёмкость магазина (ленты)	E	—	30
Скорострельность	—	c^{-1}	5
Длина очереди	—	—	5
Среднее время между очередями	β_b	с	3
Среднее время перезарядки	Δt_r	с	5
Вариант 1 (средства воздействия №1–3)			
Ошибка прицеливания	Σ_{aim1}	m^2	diag (0,002; 0,002)
Отклонение выстрелов одной очереди относительно точки прицеливания	Σ_{b1}	m^2	diag (0,016; 0,010)
Отклонение отдельных выстрелов в очереди относительно средней точки попаданий	Σ_{s1}	m^2	diag (0,008; 0,016)
Вариант 2 (средство воздействия №4)			
Ошибка прицеливания	Σ_{aim2}	m^2	diag (0,001; 0,001)
Отклонение выстрелов одной очереди относительно	Σ_{b2}	m^2	diag (0,008; 0,004)

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
точки прицеливания			
Отклонение отдельных выстрелов в очереди относительно средней точки попаданий	Σ_{s2}	м ²	diag(0,004; 0,008)

Таблица 4 – Параметры БП с осевым разлётом ПЭ

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Масса	$m_{p\ ax}$	кг	0,01
Средняя скорость на траектории	$v_{p\ ax}$	м/с	500
СКО времени задержки срабатывания	—	с	0,01
Коэффициент мощности действия БП	$k_{f\ ax}$	—	4
Угол конуса осколочного поля	α_p	—	20°
Радиус зоны безусловного поражения	$r_{0\ ax}$	м	5
Расчётная дальность до цели в момент срабатывания	—	м	18

Таблица 5 – Параметры БП с радиальным разлётом ПЭ

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Масса	$m_{p\ rad}$	кг	0,01
Средняя скорость на траектории	$v_{p\ rad}$	м/с	500
СКО времени задержки срабатывания	—	с	0,01
Коэффициент мощности действия БП	$k_{f\ rad}$	—	4
Углы сектора разлёта ПЭ в динамике	$\varphi_{p1}; \varphi_{p2}$	—	20°; 140°
Радиус зоны безусловного поражения	$r_{0\ rad}$	м	5
Расчётная дальность до цели в момент срабатывания	—	м	7

Таблица 6 – Основные параметры РЛС

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Параметры антенн			
Координата расположения антенны №1	\mathbf{r}_{a1}	м	(0; 0; 1500)
Сектор обзора по углу азимута антенны №1	φ_{a1}	—	360°
Начальный угол азимута антенны №1	$\varphi_{a1}(0)$	—	0°
Скорость вращения антенны №1	ω_{a1}	с ⁻¹	40°
Минимальная и максимальная дальность действия антенны №1	$R_{min1}; R_{max1}$	м	100; 1200
Координата расположения антенны №2	\mathbf{r}_{a2}	м	(0; 0; -1500)
Сектор обзора по углу азимута антенны №2	φ_{a2}	—	360°
Начальный угол азимута антенны №2	$\varphi_{a2}(0)$	—	0°
Скорость вращения антенны №2	ω_{a2}	с ⁻¹	40°
Минимальная и максимальная дальность действия антенны №2	$R_{min2}; R_{max2}$	м	100; 1200
Координата расположения антенны №3	\mathbf{a}_3	м	(500; 0; 0)
Сектор обзора по углу азимута антенны №3	φ_{a3}	—	180°
Начальный угол азимута антенны №3	$\varphi_{a3}(0)$	—	90°
Скорость вращения антенны №3	ω_{a3}	с ⁻¹	45°
Минимальная и максимальная дальность действия антенны №3	$R_{min3}; R_{max3}$	м	200; 1600
Сектор обзора по углу возвышения всех антенн	$\theta_{a0}; \theta_{a1}$	—	0°; 85°

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Параметры обнаружителя			
Вероятность ложной тревоги	P_{fa}	—	$8 \cdot 10^{-6}$
Вероятность правильного обнаружения	P_{cd}	—	0,85
Средняя величина выходного напряжения при наличии полезного сигнала	μ_{sig}	В	11,0
СКО величины выходного напряжения при наличии полезного сигнала	σ_{sig}	В	2,8
СКО величины выходного напряжения при отсутствии полезного сигнала	σ_{noise}	В	1,0

Гистограммы, представленные на рис. 20, наглядно показывают распределение точек падения БПЛА. Из данных гистограмм виден характер изменения распределения точек падения БПЛА при увеличении N_d : БПЛА пролетают дальше, вследствие чего увеличивается доля тех, что упали в запретные зоны (в частности, в зоны 3 и 4). Для сравнения на рис. 21 показана гистограмма, полученная при тех же условиях, но с тем отличием, что среди налетающих БПЛА есть семь, способных атаковать средство нейтрализации. Заметно увеличилась доля БПЛА упавших в охраняемые зоны, т. е. БПЛА пролетели дальше и, следовательно, эффективность системы поражения уменьшилась.

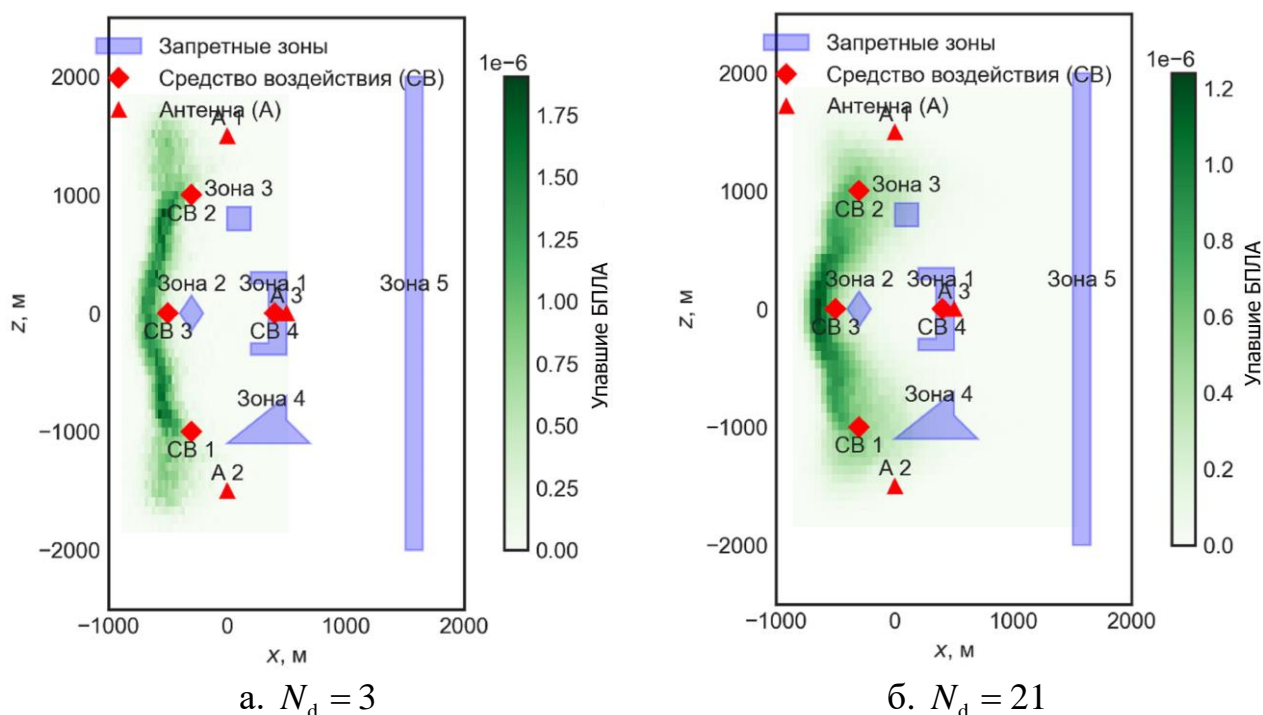


Рис. 20. Гистограмма плотности точек падения сбитых БПЛА

На рис. 22 показаны схожие гистограммы, характеризующие распределение точек обнаружения целей антеннами РЛС. Эти данные могут использоваться для анализа площади покрытия пространства радаром. На указанных графиках видны более насыщенные цветом области – это области пересечений зон обзора антенн. Каждая из трёх антенн работала в своём режиме, т. е. антенны

различались зоной обзора (реализовывали полный или секторный обзор), дальностью обнаружения целей, скоростью вращения и пр.

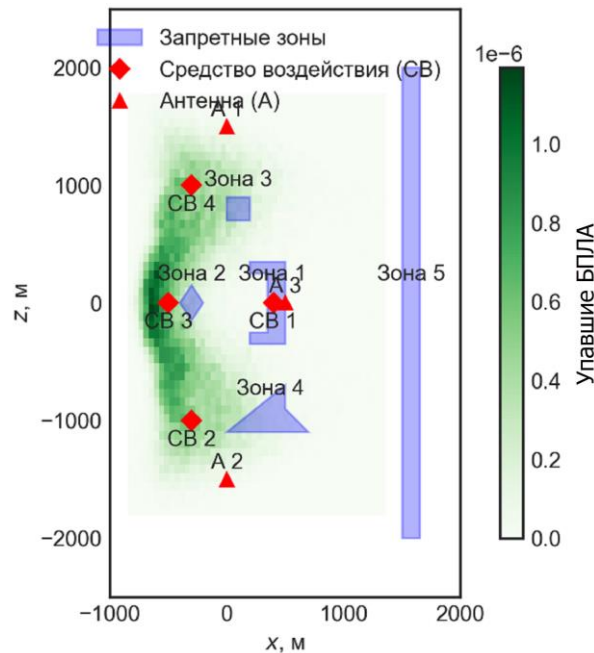
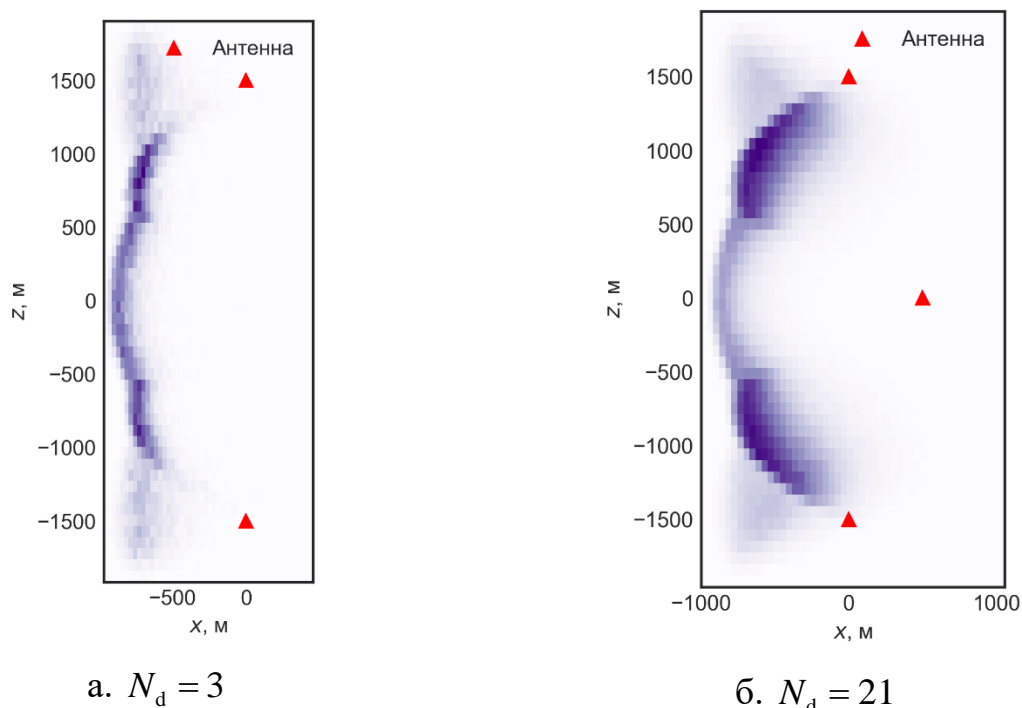


Рис. 21. Гистограмма плотности точек падения в случае налёта двадцати одного БПЛА при наличии среди них семи БПЛА, способных атаковать систему поражения



а. $N_d = 3$

б. $N_d = 21$

Рис. 22. Качественная гистограмма плотности обнаружения БПЛА радарам

Диаграммы рассеяния, показанные на рис. 23, получены при обработке накопленной статистики по расходу БП на поражение целей и могут использоваться для анализа эффективности работы отдельных средств противодействия

БПЛА. Так, из приведённых графиков видно, что расход снарядов средством нейтрализации №4 независимо от N_d в среднем больше – в 1,5 раза и более, – чем у остальных средств противодействия (оранжевая линия – медианное значение на рис. 23). Тогда, исходя из рис. 20 и рис. 21, можно сделать вывод, что наличие средства нейтрализации №4 либо излишне, либо имеет смысл переместить его в отрицательном направлении оси Ox в сторону большей плотности уничтожения целей, либо следует улучшить его точность. Остальные же средства нейтрализации БПЛА расходуют примерно одинаковое количество средств поражения, что объясняется их расположением почти в одну линию, а также равномерным распределением точек появления БПЛА по координате z .

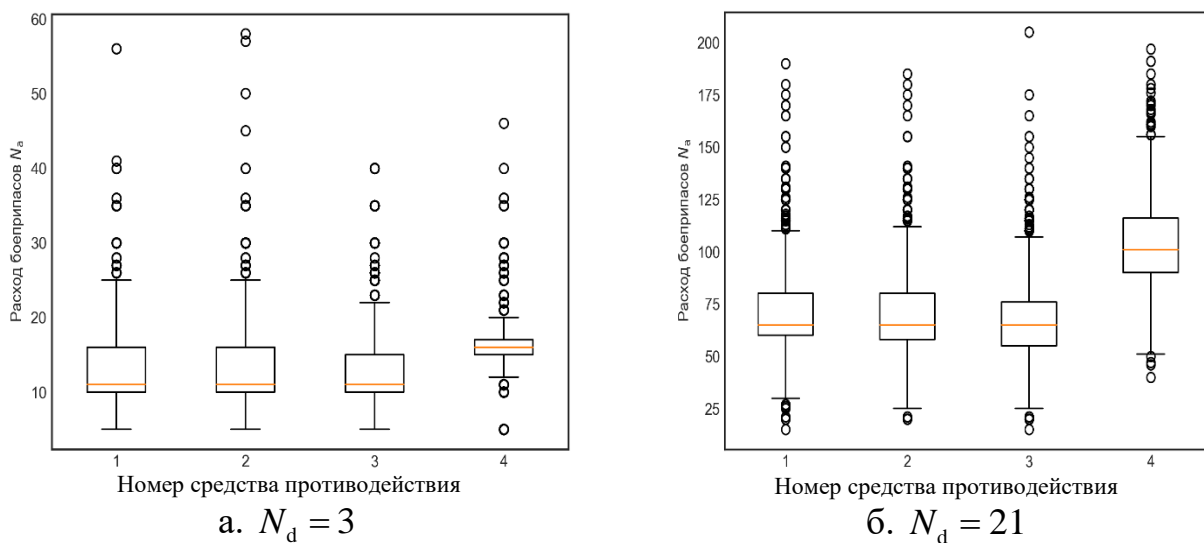


Рис. 23. Расход БП средствами противодействия

На рис. 24 показаны дополнительные критерии оценки эффективности системы поражения БПЛА, а именно, гистограммы плотности вероятности уничтожения всех БПЛА и падения БПЛА в запретные зоны, а также диаграммы рассеяния времени выполнения задачи противодействия T . Из гистограмм плотностей вероятности могут быть получены оценки для вероятностей уничтожения целей и падения их в запретные зоны в заданных условиях. Из показанных гистограмм следует, что при увеличении N_d возрастает доля БПЛА, падающих в охраняемые зоны. Также видно, что уничтожаются не все цели (верхняя гистограмма на рис. 24б), при этом увеличивается время T .

В процессе разработки ИМ сформированы дополнительные критерии эффективности системы поражения малоразмерных БПЛА – интенсивность их уничтожения и падения на поверхность земли и в запретные области (рис. 25). По горизонтальной оси гистограмм на рис. 25 отложены значения относительного времени τ , рассчитываемого как $\tau_i = T_i / T_{\max}$, где $i = 1, 2, \dots, N_{\text{run}}$; T_{\max} рассчитывается по формуле (19). Гистограммы интенсивностей могут помочь в анализе динамики процесса противодействия. Например, из гистограмм на рис. 25 можно сделать следующий вывод: увеличение N_d ведёт к смещению максимума доли уничтоженных БПЛА в сторону большего τ , т. е. бóльшая

часть целей уничтожается позже при большем N_d . При этом не стоит забывать учитывать тот факт, что с увеличением N_d увеличивается и T_{\max} .

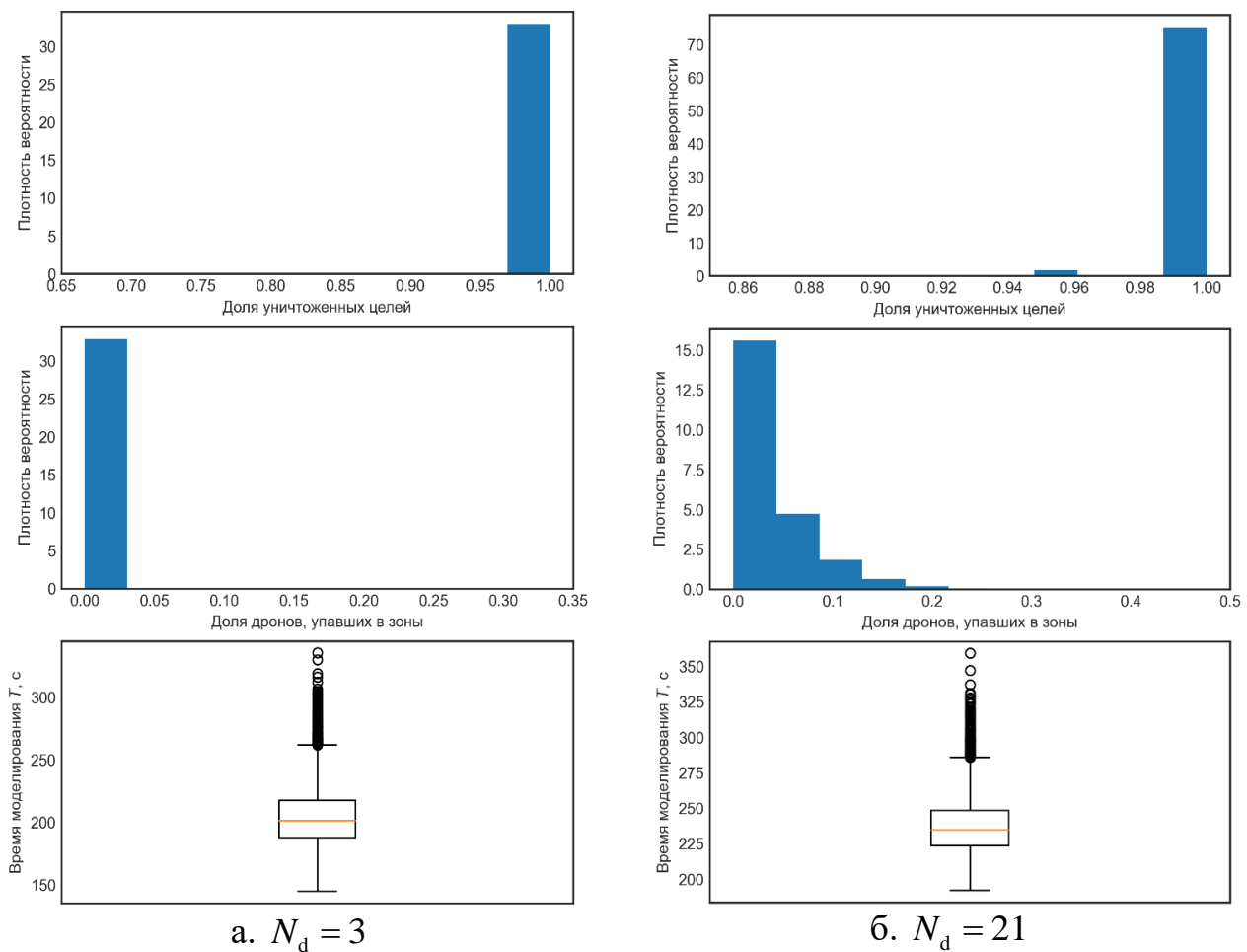
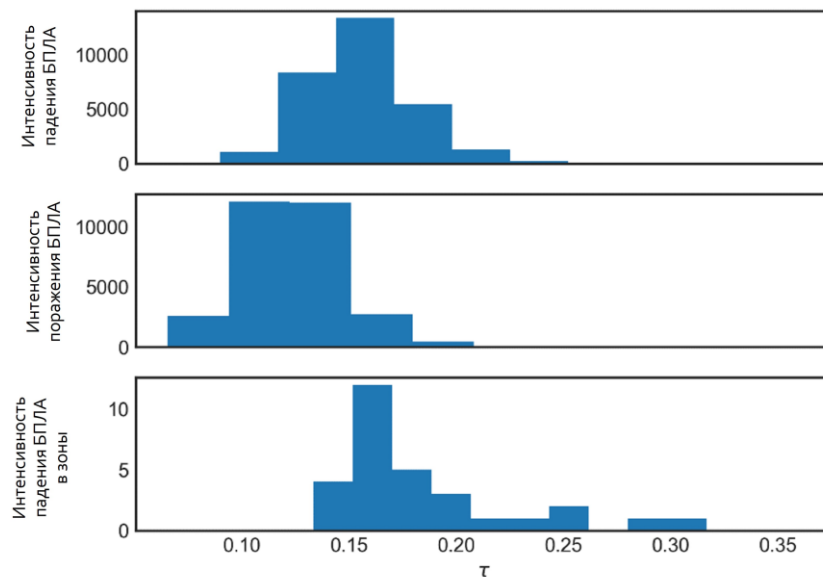


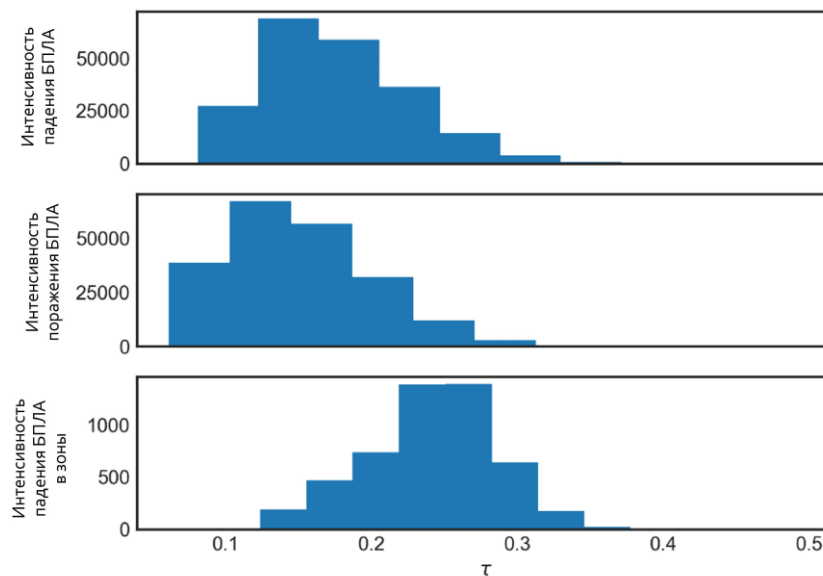
Рис. 24. Критерии оценки эффективности системы поражения БПЛА

Из гистограмм интенсивностей совместно с диаграммами рассеяния времени T рис. 24 может быть получена оценка времени уничтожения той или иной доли БПЛА. Также при увеличении N_d видно логичное следствие: процесс противодействия растягивается во времени. Зная T_{\max} для каждого N_d , возможно получить абсолютное значение изменения продолжительности противодействия той или иной доле налетающих БПЛА. Большей эффективности системы противодействия БПЛА соответствует более узкие гистограммы интенсивности, пик которых расположен при меньших значениях t .

Гистограммы интенсивности значительно отличаются при перемещении средств противодействия в процессе борьбы с БПЛА. Результаты моделирования на рис. 26 получены при тех же исходных данных, что и графики на рис. 25, за исключением возможности перемещения средств противодействия: №1-№3 перемещались по координате x в случайную точку в пределах 200 м от своего начального положения; №4 – в пределах 400 м вдоль оси Oz симметрично относительно $z = 0$. Это привело к снижению эффективности системы поражения БПЛА, т. к. увеличилось время T и доля БПЛА, падающих в запретные зоны.



а. $N_d = 3$



б. $N_d = 21$

Рис. 25. Гистограммы интенсивности

На рис. 27 и рис. 28 показаны результаты для программируемых БП с различными ошибками в определении времени задержки срабатывания Δt снаряда у цели (таблица 7). Из гистограмм на рис. 27 следует, что увеличение ошибки приводит к уменьшению эффективности средства противодействия, т. к. точки падений БПЛА смещены на большие значения координаты x . В данном сценарии не было подсистемы обнаружения целей. БПЛА летели слева направо при тех же размерах областей начала и конца полёта БПЛА. На рис. 28 приведены диаграммы рассеяния расхода БП N_a и времени выполнения задачи противодействия T при налёте трёх БПЛА. Согласно диаграммам в данном случае аксиальные БП более эффективны по критериям N_a и T , чем радиальные. Эффективность простых БП типа пуль и программируемых БП сравнивается и по критерию вероятности поражения целей. На рис. 29 показана вероятность поражения целей при различном числе одновременно налетающих БПЛА. Три

варианта средств нейтрализации соответствуют различной степени точности этих средств: от наибольшей (вар. №1) до наименьшей (вар. №3). Характеристики точности представлены в таблице 8. Остальные параметры средств нейтрализации те же, что в таблице 3.

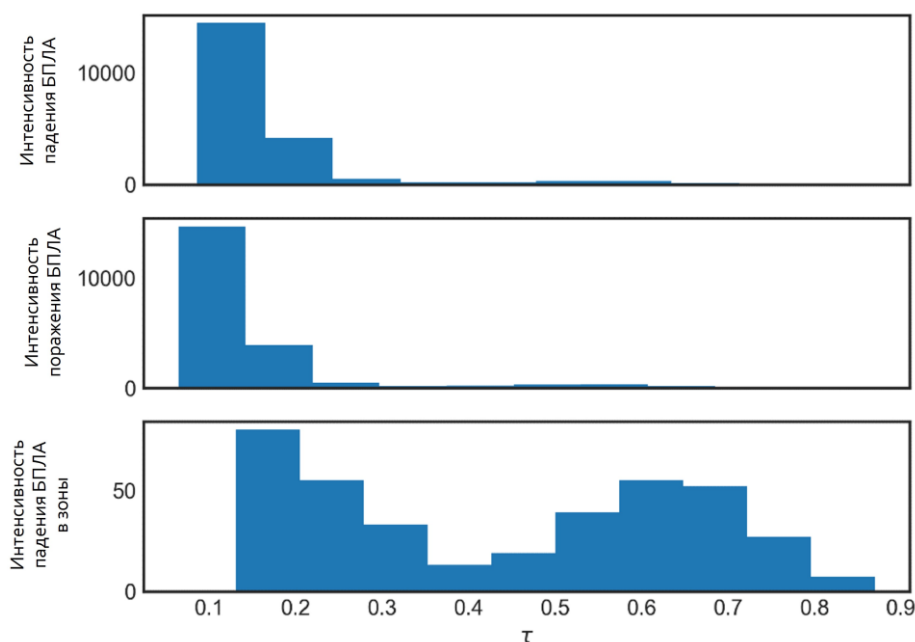


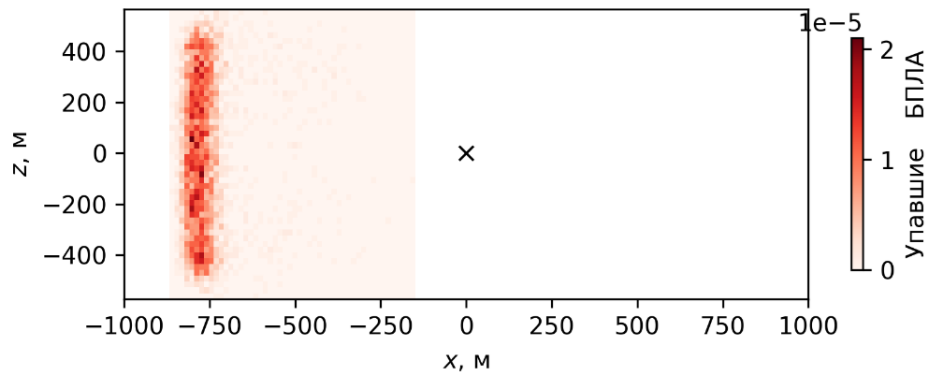
Рис. 26. Гистограммы интенсивности при $N_d = 21$

Таблица 7 – СКО времени срабатывания БП у цели

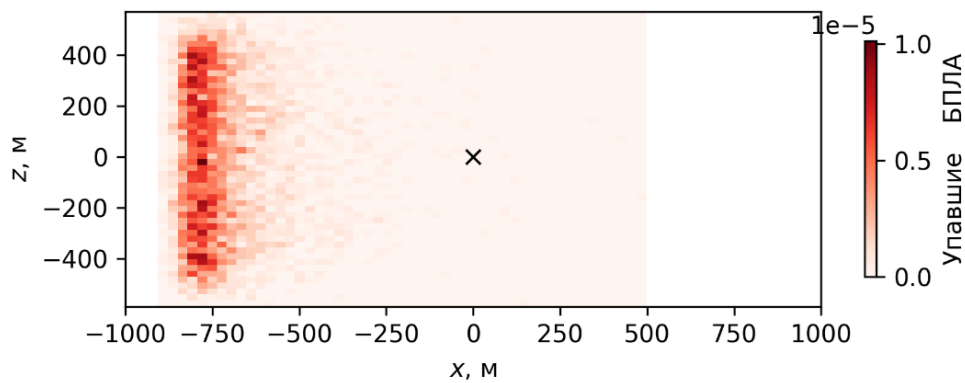
Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta t, c$	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007

Таблица 8 – Варианты точностных характеристик средств противодействия

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Вариант 1			
Ошибка прицеливания	Σ_{aim1}	m^2	diag (0,001; 0,001)
Отклонение выстрелов одной очереди относительно точки прицеливания	Σ_{b1}	m^2	diag (0,016; 0,008)
Отклонение отдельных выстрелов в очереди относительно средней точки попаданий	Σ_{s1}	m^2	diag (0,008; 0,016)
Вариант 2			
Ошибка прицеливания	Σ_{aim2}	m^2	diag (0,001; 0,001)
Отклонение выстрелов одной очереди относительно точки прицеливания	Σ_{b2}	m^2	diag (0,012; 0,016)
Отклонение отдельных выстрелов в очереди относительно средней точки попаданий	Σ_{s2}	m^2	diag (0,006; 0,012)
Вариант 3			
Ошибка прицеливания	Σ_{aim3}	m^2	diag (0,001; 0,001)
Отклонение выстрелов одной очереди относительно точки прицеливания	Σ_{b3}	m^2	diag (0,008; 0,004)
Отклонение отдельных выстрелов в очереди относительно средней точки попаданий	Σ_{s3}	m^2	diag (0,004; 0,008)



а. Ошибка 0,001 с



б. Ошибка 0,007 с

Рис. 27. Влияние ошибки времени срабатывания аксиального БП (крестиком обозначено средство противодействия)

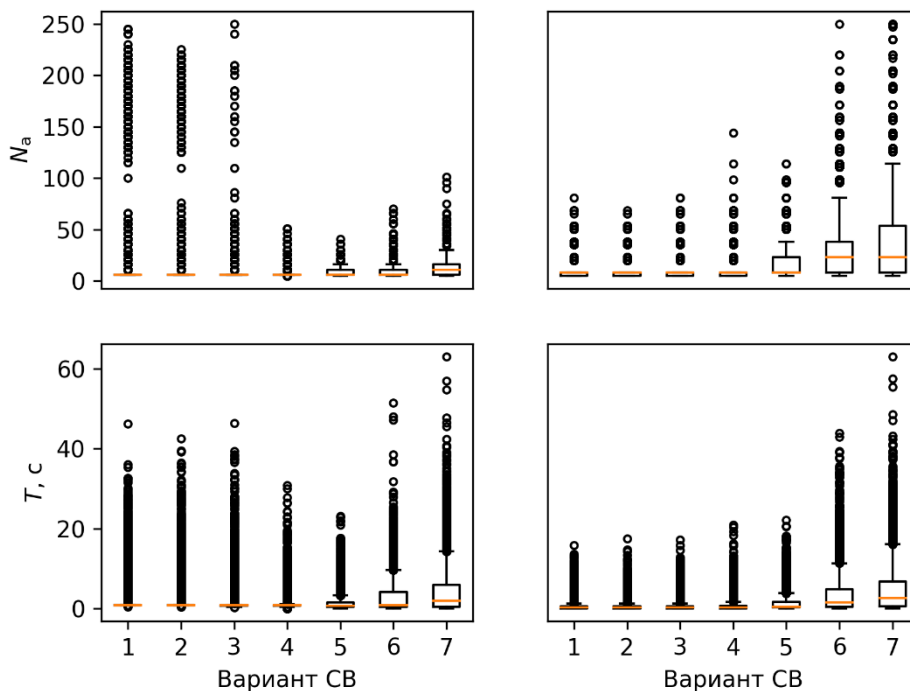


Рис. 28. Расход аксиальных (слева) и радиальных (справа) БП с различными ошибками времени задержки срабатывания: от минимальной (вар. 1) до максимальной (вар. 7)

На рис. 30 приведена зависимость уничтожения средства нейтрализации и антенны РЛС от количества одновременно налетающих БПЛА. В каждом налёте было от 1 до 4 БПЛА, способных атаковать систему противодействия. Антенна или средство противодействия выбирались с равной вероятностью.

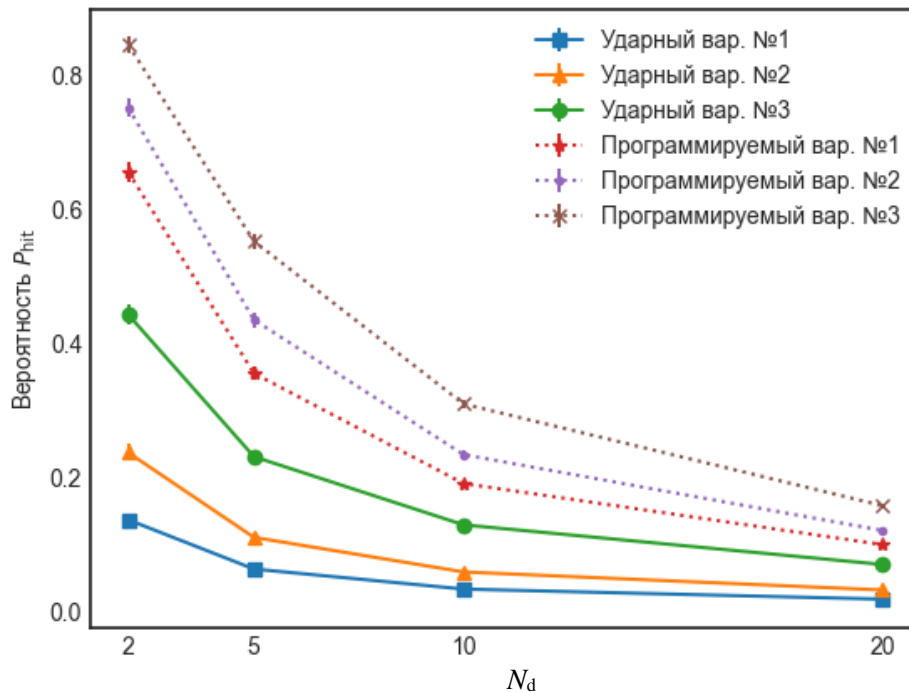


Рис. 29. Вероятность уничтожения БПЛА средством противодействия с использованием БП различного типа

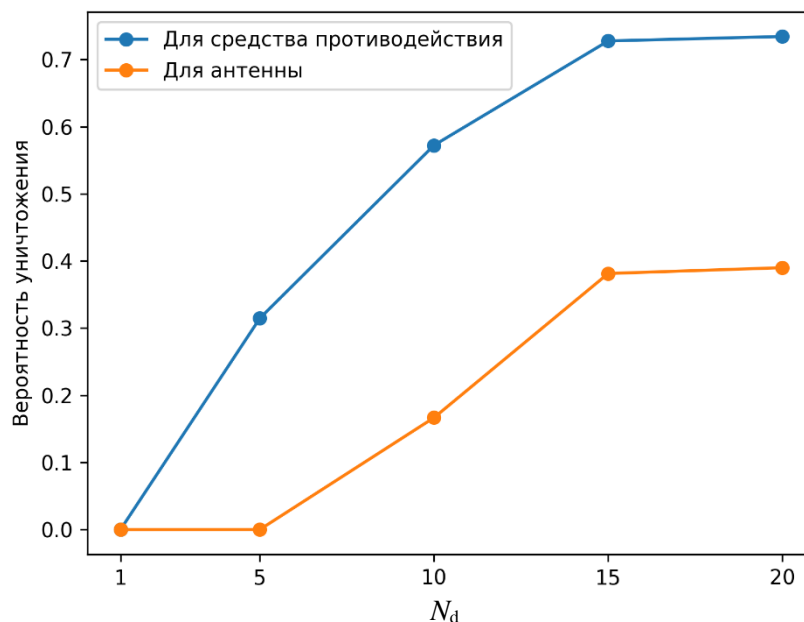


Рис. 30. Вероятность уничтожения элементов системы поражения при наличии атакующих БПЛА

Выводы

Таким образом, с помощью разработанной ИМ возможно:

- 1) оценивать эффективность СОЛП МБПЛА по различным показателям: вероятности уничтожения целей, расходу БП, времени выполнения задачи, вероятности падения БПЛА в запретные зоны, интенсивности уничтожения целей и др.;
- 2) моделировать систему поражения БПЛА с различным набором элементов и различной пространственной структурой. Можно, например, исследовать только подсистему нейтрализации, только подсистему обнаружения или любые их комбинации. Отдельные элементы системы могут иметь различные тактико-технические характеристики;
- 3) оценивать эффективность системы поражения при противодействии малоразмерным БПЛА, которые могут изменять свою траекторию в полёте;
- 4) исследовать эффективность системы поражения в сценариях с БПЛА, которые способны атаковать её элементы, а также сценарии с БПЛА, которые реализуют определённую тактику налёта с отвлекающими и атакующими БПЛА;
- 5) оценивать эффективность системы поражения в сценариях, в которых рассматривается защита определённых областей пространства;
- 6) исследовать эффективность системы поражения в сценариях налёта БПЛА с различных направлений, когда элементы системы поражения способны перемещаться;
- 7) проводить сравнительную оценку эффективности вариантов системы поражения малоразмерных БПЛА.

В дальнейшем планируется на основе разработанной ИМ сформировать методику синтеза наиболее эффективных систем обнаружения и нейтрализации малоразмерных БПЛА по критерию, учитывающему как эффективность системы поражения БПЛА, так и минимально возможное количество задействованных при этом элементов системы и их стоимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-06090 мк).

Литература

1. AL-Dosari K., Hunaiti Z., Balachandran W. Systematic Review on Civilian Drones in Safety and Security Applications // Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2023. Vol. 7. № 3. doi: 10.3390/drones7030210.
2. Alsamhi S.H., Ma O., Ansari M.S., Almalki F.A. Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 128125–128152. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2934998.
3. Chen H., Hu Z., Solak S. Improved delivery policies for future drone-based delivery systems // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294. № 3. P. 1181–1201. doi: 10.1016/j.ejor.2021.02.039.

4. Bisio I., Garibotto C., Haleem H., Lavagetto F., Sciarrone A. A Systematic Review of Drone Based Road Traffic Monitoring System // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 101537–101555. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207282.
5. Park S., Kim H.T., Lee S., Joo H., Kim H. Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 42635–42659. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
6. Yaacoub J.P., Noura H., Salman O., Chehab A. Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations // *Internet of Things*. 2020. Vol. 11. doi: 10.1016/j.iot.2020.100218.
7. Демьянович М.А. Использование беспилотных летательных аппаратов в преступных целях: методы противодействия и борьбы // *Правопорядок: история, теория, практика*. 2019. № 2 (21). С. 108–111.
8. Frantzman S.J. *The Drone Wars: Pioneers, Killing Machines, Artificial Intelligence, and the Battle for the Future*. Bombardier Books, 2021. 288 p.
9. Calcara A., Gilli A., Gilli M., Marchetti R., Zaccagnini I. Why Drones Have Not Revolutionized War: The Enduring Hider-Finder Competition in Air Warfare // *International Security*. 2022. Vol. 46. № 4. P. 130–171. doi: 10.1162/isec_a_00431.
10. Modebadze V. The importance of drones in modern warfare and armed conflicts // *Journal of Social Sceinces and Arts*. 2021. Vol. 1. № 2. P. 89–98.
11. Абросимов В. К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов: монография. М.: Издательский Дом «Наука», 2017. 304 с.
12. Johnson J. *The fast and the furious: Drone swarming and hypersonic weapons* // *Artificial intelligence and the future of warfare*. Manchester, England: Manchester University Press, 2021. 241 p. doi: 10.7765/9781526145062.00015.
13. Roldan J.J. Garcia-Aunon P., Pena-Tapia E., Barrientos A. SwarmCity Project: Can an Aerial Swarm Monitor Traffic in a Smart City? // *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops) (Kyoto, March 11–15 2019)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 862–867.
14. He D., Yang G., Li H., Chan S., Cheng Ya., Guizani N. An Effective Countermeasure against UAV Swarm Attack // *IEEE Network*. 2021. Vol. 35. № 1. P. 380–385. doi: 10.1109/MNET.011.2000380.
15. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. СПб.: Научно-технологические технологии, 2020. 204 с.
16. Sahingoz O.K. Generation of bezier curve-based flyable trajectories for multi-UAV systems with parallel genetic algorithm // *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. Springer. 2014. Vol. 74. № 1–2. P. 499–511. doi: 10.1007/s10846-013-9968-6.
17. Sabetghadam B., Cunha R., Pascoal A. Trajectory Generation for Drones in Confined Spaces Using an Ellipsoid Model of the Body // *IEEE Control Systems Letters*. 2022. Vol. 6. P. 1022–1027. doi: 10.1109/LCSYS.2021.3088406.
18. Wang Y., Wang X., Shen L. Approximate Optimal Curve Path Tracking Control for Nonlinear Systems with Asymmetric Input Constraints // *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2022. Vol. 6, № 11. doi: 10.3390/drones6110319.

19. Satai, H.A., Zahra M.M.A., Rasool Z.I., Abd-Ali R.S., Pruncu C.I. Bézier Curves-Based Optimal Trajectory Design for Multirotor UAVs with Any-Angle Pathfinding Algorithms // *Sensors*. 2021. Vol. 21. doi: 10.3390/s21072460.

20. Zahoor A., Farman U., Cong T., Sungchang L. Efficient Energy Flight Path Planning Algorithm Using 3-D Visibility Roadmap for Small Unmanned Aerial Vehicle // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2017. Vol. 2017. 13 p. doi: 10.1155/2017/2849745.

21. Machmudah A., Parman S. Bezier Curve Collision-Free Route Planning Using Meta-Heuristic Optimization // *International Journal of Artificial Intelligence & Robotics (IJAIR)*. 2021. Vol. 3. № 1. P. 1–14. doi: 10.25139/ijair.v3i1.3821.

22. Lengyel E. *Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics*. Boston: Course Technology PTR, 2012. 545 p.

23. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. New York: Cambridge University Press, 2004. 670 p. doi: 10.1017/CBO9780511811685.

24. Blasi L., D'Amato E., Mattei M., Notaro I. UAV Path Planning in 3D Constrained Environments Based on Layered Essential Visibility Graphs // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022. P. 1–30. doi: 10.1109/TAES.2022.3213230.

25. Рюмин А.В. Оценка вероятности поражения микро-БЛА стрелковым оружием с помощью имитационной модели // *Прикладные проблемы безопасности технических и биотехнических систем*. 2019. № 1. С. 24–31.

26. Li J., Yang W., Zhang Y., Pei Y., Ren Y., Wang W. Aircraft vulnerability modeling and computation methods based on product structure and CATIA // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013. Vol. 26. № 2. P. 334–342. doi: 10.1016/j.cja.2013.02.010.

27. Hanson A.J., Cunningham S. *Visualizing Quaternions*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2006. 516 p.

28. Kartashov V.M., Oleynikov V.M., Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V. Methods for detection-recognition of radar, acoustic, optical and infrared signals of unmanned aerial vehicles // *Radiotekhnika*. 2021. № 205. P. 138–153. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i9.30.

29. Opromolla R., Fasano G., Accardo D. A Vision-Based Approach to UAV Detection and Tracking in Cooperative Applications // *Sensors*. 2018. Vol. 18. № 10. doi: 10.3390/s18103391.

30. Barisic A., Car M., Bogdan S. Vision-based system for a real-time detection and following of UAV // *2019 International Workshop on Research, Education and Development on Unmanned Aerial Systems (RED-UAS 2019)*. Cranfield, 2019. P. 156–159. doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999675.

31. Рябуха В.П. Радиолокационное наблюдение беспилотных летательных аппаратов (обзор) // *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 63. № 11. С. 655–669. doi: 10.20535/S0021347020110011.

32. Верба В.С., Гаврилов К.Ю., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г., Филатов А.А. *Радиолокация для всех / под ред. В.С. Вербы*. М.: Техносфера, 2020. 504 с.

33. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.

34. Лебединец А.Н. Организация и боевые возможности мотострелковых подразделений малого масштаба. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 108 с.

35. Быков Н.В., Власова Н.С., Федулов В.А. Имитационная модель для оценки потенциальных характеристик перспективных прицельных систем стрелкового оружия // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 7-8. С. 12–20.

36. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Ладов С.В., Орленко Н.П., Охитин В.Н., Ришняк А.Г., Селиванов В.В., Соловьев В.С. Средства поражения и боеприпасы / под ред. В.В. Селиванова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.

References

1. AL-Dosari K., Hunaiti Z., Balachandran W. Systematic Review on Civilian Drones in Safety and Security Applications. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2023, vol. 7, no. 3, doi: 10.3390/drones7030210.

2. Alsamhi S.H., Ma O., Ansari M.S., Almalki F.A. Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 128125–128152, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2934998.

3. Chen H., Hu Z., Solak S. Improved delivery policies for future drone-based delivery systems. *European Journal of Operational Research*, 2021, vol. 294, no. 3, pp. 1181–1201, doi: 10.1016/j.ejor.2021.02.039.

4. Bisio I., Garibotto C., Haleem H., Lavagetto F., Sciarrone A. A Systematic Review of Drone Based Road Traffic Monitoring System. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 101537–101555, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207282.

5. Park S., Kim H.T., Lee S., Joo H., Kim H. Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 42635–42659, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.

6. Yaacoub J.P., Noura H., Salman O., Chehab A. Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations. *Internet of Things*, 2020, vol. 11, doi: 10.1016/j.iot.2020.100218.

7. Demyanovich M.A. Use of Unmanned Aerial Vehicles in Criminal Intent: Methods of Counteraction and Fight. *Legal order: history, theory, practice*, 2019, no. 2 (21), pp. 108–111. (in Russian).

8. Frantzman S.J. *The Drone Wars: Pioneers, Killing Machines, Artificial Intelligence, and the Battle for the Future*. Bombardier Books, 2021. 288 p.

9. Calcara A., Gilli A., Gilli M., Marchetti R., Zaccagnini I. Why Drones Have Not Revolutionized War: The Enduring Hider-Finder Competition in Air Warfare. *International Security*, 2022, vol. 46, no. 4, pp. 130–171, doi: 10.1162/isec_a_00431.

10. Modebadze V. The importance of drones in modern warfare and armed conflicts. *Journal of Social Sciences and Arts*, 2021, vol. 1, no. 2, pp. 89–98.

11. Abrosimov V.K. *Kollektivy intellektual'nykh letatel'nykh apparatov. Monografiya* [Intelligent Aircraft Collectives. Monography]. Moscow, Izdatel'skii Dom «Nauka», 2017. 304 p. (in Russian).
12. Johnson J. *The fast and the furious: Drone swarming and hypersonic weapons*. Artificial intelligence and the future of warfare. Manchester, Manchester University Press, 2021. 241 p. doi: 10.7765/9781526145062.00015.
13. Roldan J.J. Garcia-Aunon P., Pena-Tapia E., Barrientos A. SwarmCity Project: Can an Aerial Swarm Monitor Traffic in a Smart City? *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. Kyoto, 2019, pp. 862–867.
14. He D., Yang G., Li H., Chan S., Cheng Ya., Guizani N. An Effective Countermeasure against UAV Swarm Attack. *IEEE Network*, 2021, vol. 35, no. 1, pp. 380–385, doi: 10.1109/MNET.011.2000380.
15. Makarenko S. I. *Protivodeistvie bespilotnym letatel'nyim apparatam. Monografiia* [Countermeasures Against Unmanned Aerial Vehicles. Monography]. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2020. 204 p. (in Russian).
16. Sahingoz O.K. Generation of bezier curve-based flyable trajectories for multi-UAV systems with parallel genetic algorithm. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2014, vol. 74, no. 1–2, pp. 499–511. doi: 10.1007/s10846-013-9968-6.
17. Sabetghadam B., Cunha R., Pascoal A. Trajectory Generation for Drones in Confined Spaces Using an Ellipsoid Model of the Body. *IEEE Control Systems Letters*, 2022, vol. 6, pp. 1022–1027, doi: 10.1109/LCSYS.2021.3088406.
18. Wang Y., Wang X., Shen L. Approximate Optimal Curve Path Tracking Control for Nonlinear Systems with Asymmetric Input Constraints. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022, vol. 6, no. 11, doi: 10.3390/drones6110319.
19. Satai, H.A., Zahra M.M.A., Rasool Z.I., Abd-Ali R.S., Pruncu C.I. Bézier Curves-Based Optimal Trajectory Design for Multirotor UAVs with Any-Angle Pathfinding Algorithms. *Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2021, vol. 21, doi: 10.3390/s21072460.
20. Zahoor A., Farman U., Cong T., Sungchang L. Efficient Energy Flight Path Planning Algorithm Using 3-D Visibility Roadmap for Small Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017, vol. 2017, 13 p. doi: 10.1155/2017/2849745.
21. Machmudah A., Parman S. Bezier Curve Collision-Free Route Planning Using Meta-Heuristic Optimization. *International Journal of Artificial Intelligence & Robotics (IJAIR)*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 1–14, doi: 10.25139/ijair.v3i1.3821.
22. Lengyel E. *Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics*. Boston, Course Technology PTR, 2012. 545 p.
23. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. New York, Cambridge University Press, 2004. 670 p. doi: 10.1017/CBO9780511811685.
24. Blasi L., D'Amato E., Mattei M., Notaro I. UAV Path Planning in 3D Constrained Environments Based on Layered Essential Visibility Graphs. *IEEE*

Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, pp. 1–30, doi: 10.1109/TAES.2022.3213230.

25. Ryumin A.V. The Estimated Probability of Micro UAV Small Arms Defeating by Means of the Simulated Model. *Prikladnye problemy bezopasnosti tekhnicheskikh i biotekhnicheskikh sistem*, 2019, no. 1, pp. 24–31. (in Russian).

26. Li J., Yang W., Zhang Y., Pei Y., Ren Y., Wang W. Aircraft vulnerability modeling and computation methods based on product structure and CATIA. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, vol. 26, no. 2, pp. 334–342, doi: 10.1016/j.cja.2013.02.010.

27. Hanson A.J., Cunningham S. *Visualizing Quaternions*. San Francisco, Morgan Kaufmann, 2006. 516 p.

28. Kartashov V.M., Oleynikov V.M., Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I. V., Zubkov O.V. Methods for detection-recognition of radar, acoustic, optical and infrared signals of unmanned aerial vehicles. *Radiotekhnika*, 2021, no. 205, pp. 138–153, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i9.30.

29. Opromolla R., Fasano G., Accardo D. A Vision-Based Approach to UAV Detection and Tracking in Cooperative Applications. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 10, pp. 3391, doi: 10.3390/s18103391.

30. Barisic A., Car M., Bogdan S. Vision-based system for a real-time detection and following of UAV. *2019 International Workshop on Research, Education and Development on Unmanned Aerial Systems (RED-UAS 2019)*. Cranfield, 2019, pp. 156–159, doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999675.

31. Riabukha V.P. Radiolokatsionnoe nabliudenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov (obzor) [Radar Surveillance of Unmanned Aerial Vehicles (a Review)]. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2020, vol. 63, no. 11, pp. 655–669, doi: 10.20535/S0021347020110011. (in Russian).

32. Verba V.S., Gavrilov K.Iu., Il'chuk A.R., Tatarskii B.G., Filatov A.A. *Radiolokatsiia dlia vsekh* [Radiolocation for Everyone]. Moscow, Tekhnosfera, 2020. 504 p. (in Russian).

33. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar Systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2004. 320 p. (in Russian).

34. Lebedinets A.N. *Organizatsiia i boevye vozmozhnosti motostrelkovykh podrazdelenii malogo masshtaba* [Organization and Combat Capabilities of Small-Scale Motorized Rifle Units]. Moscow, Bauman MSTU, 2012. 108 p. (in Russian).

35. Bykov N.V., Vlasova N.S., Fedulov V.A. A Simulation Model for Estimating the Potential Characteristics of Advanced Aiming Equipment of Small Arms. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2021, no. 7-8 (157-158), pp. 12–20. (in Russian).

36. Babkin A.V., Veldanov V.A., Griaznov E.F., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Ladov S.V., Orlenko N.P., Okhitin V.N., Rishniak A.G., Selivanov V.V., Solov'ev V.S. *Sredstva porazheniia i boepripasy* [Engagement Systems and Ammunition]. Moscow, Bauman MSTU, 2008. 984 p. (in Russian).

Статья поступила 10 августа 2023 г.

Информация об авторах

Федулов Вадим Алексеевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры ракетных и импульсных систем. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: эффективность систем; компьютерное моделирование; системный анализ. E-mail: vadimfedulov.bmstu@gmail.com

Быков Никита Валерьевич – доктор технических наук, доцент. Профессор кафедры ракетных и импульсных систем. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Заведующий кафедрой физики. Российский университет транспорта (МИИТ). Область научных интересов: компьютерное моделирование сложных систем; оценка эффективности; методы оптимизации. E-mail: bykov@bmstu.ru

Баскаков Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, доцент. Профессор кафедры технологий ракетно-космического машиностроения. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: численный анализ; математическое моделирование; технологии ракетно-космического машиностроения и специальной техники. E-mail: baskakov_vd@bmstu.ru

Адрес: 105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Estimating of the Effectiveness of the Weapon System against of Small Unmanned Aerial Vehicles by Computer Simulation

V. A. Fedulov, N. V. Bykov, V. D. Baskakov

Purpose. The study is dedicated to the development of the computer model to estimate the effectiveness of a complex anti-drone system (ADS). In this study the drone is a small unmanned aerial vehicle (UAV). The ADS detects, localizes and eliminates UAVs. It consists of radars and countermeasure devices which have different characteristics and configurations. The simulation model allows to bound the usefulness of engineering solutions in the first steps of system design. Also, the model affords of opportunity to compare those solutions with each other. Moreover, it is planned to use the ADS computer model to design more efficient systems and to solve optimization problems for different scenarios of challenges. Currently researches of such complex ADS are not found. **Methods.** The Monte-Carlo method is the basic modeling method. Statistics is accumulated during the simulation. It allows to calculate criteria of the ADS effectiveness. The criteria are the UAVs' destruction probability, ammunition consumption, task-performance time, the probability of incapacitation of the countermeasure system elements, etc. The discrete-event approach makes it possible to simulate long-duration processes in the practically boundless space. Stochastic finite state machines present states of models of the ADS elements and transferences between these states. The UAV's trajectory is presented by third order Bezier curve. This curve is widely used in studies of UAVs motion. The computer model takes into account the geometry of the UAV and the change in the orientation of it during the flight. Smooth interpolation of the rotation matrices of the associated coordinate system is carried out using spherical interpolation of quaternions. The fact of targets detection by the radar is established according to the Neyman-Pearson criterion. **Novelty.** The novelty is due to the possibility of modeling the ADS,

consisting of several interconnected means of neutralizing and detecting targets. The model emphasizes the possibility of disabling the ADS' elements. It is possible to figure out the effectiveness of the countermeasure system according to various criteria. Moreover, a new efficiency criterion has been formulated. It is the probability of destroyed UAVs falling into restricted (protected) zones. Such zones correspond, for example, to critically important infrastructure. The set of methods used in the developed simulation model and its software implementation are also new, namely, the discrete-event approach is applied in the context of object-oriented programming and agent-based modeling. This allows to model multifarious behavior of agents such as the agents of UAVs, radar and countermeasure subsystems. **Results.** The computer model allows, in a reasonable time and with limited computing power, to evaluate the effectiveness of various modifications of the ADS under different scenarios and target environment. **Practical relevance.** The simulation model can be employed and improved in the course of research and development work. It also can be applied at the initial stages of the ADS design for a more rigorous justification of technical solutions.

Key words: computer simulation, small UAV, drone, anti-drone system, efficiency, detection, radar, neutralization, important infrastructure.

Information about Authors

Vadim Alexeyevich Fedulov – Doctoral Student. The postgraduate student of the Propulsion and Impulse Systems Department. Bauman Moscow State Technical University. Field of research: systems efficiency; computer simulation; system analysis. E-mail: vadimfedulov.bmstu@gmail.com

Nikita Valerievich Bykov – Holder of an Advanced Doctorate in Engineering, associate professor. Professor of the Propulsion and Impulse Systems Department. Bauman Moscow State Technical University. Head of the Department of Physics. Russian University of Transport. Field of research: computer simulation; systems efficiency; optimization. E-mail: bykov@bmstu.ru

Vladimir Dmitrievich Baskakov – Holder of an Advanced Doctorate in Engineering, associate professor. Professor of the Department of Technology of Manufacturing for Aerospace. Bauman Moscow State Technical University. Field of research: numerical analysis; calculus; technologies of rocket and space engineering and special equipment. E-mail: baskakov_vd@bmstu.ru

Address: Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya street, 5.