

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕВОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

Н.В. Быков, М.С. Товарнов, В.А. Федулов, Н.С. Власова, А.А. Пожарский
(Москва)

Введение

В связи с широким распространением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения разного рода задач в гражданской и военной сферах проблема противодействия им приобрела значительную актуальность. К настоящему времени существует довольно большое количество способов противодействия БПЛА, которые можно свести к следующим: перехвату (нарушению) управления, физическому перехвату или физическому уничтожению БПЛА.

Перехват управления БПЛА в широком смысле возможен средствами радиоэлектронной борьбы или специальными способами получения контроля над БПЛА, например, путем взлома канала управления дрона, использования уязвимостей оригинального программного обеспечения БПЛА и т.п. [1, 2].

Физический перехват БПЛА осуществляется с помощью различных устройств, например, специальных выстреливаемых сетей, которые блокируют двигатель и элементы систем управления БПЛА, тем самым делая невозможным продолжение его полета [1, 3]. По сути физический перехват – это способ нейтрализации беспилотника через его обездвиживание.

В качестве основных способов физического уничтожения БПЛА выступают поражение дронов системами лазерного, электромагнитного, ракетного и артиллерийского оружия [1, 3, 4]. Все они приводят к разрушению летательного аппарата при воздействии на него.

В данной работе внимание сосредоточено на огневом (физическом) поражении БПЛА с помощью автоматических пушек. С одной стороны, огневое поражение автоматическим оружием является довольно очевидным и надежным способом противодействия БПЛА при угрозах воздействия на критически важные объекты инфраструктуры, террористических угрозах или в условиях боевых действий. В этом случае в качестве огневых средств выступают «традиционные» образцы оружия, давно отработавшие стрельбу по разного рода воздушным целям. С другой стороны, сами БПЛА как объекты поражения для указанных огневых средств являются довольно новыми целями, требующими оценки эффективности противодействия им в различных условиях.

В работе [5] приведена методика оценки эффективности систем противодействия массированному применению мини-БПЛА на основе теории массового обслуживания, а именно марковских потоков, что позволяет учесть усредненные временные показатели процесса противодействия. Однако такой подход практически не учитывает влияние на вероятность поражения размеров и формы БПЛА.

В работе [6] проводилась оценка эффективности противодействия малым БПЛА с помощью штурмовой винтовки с учетом формы цели. В качестве оценочной характеристики выступала вероятность поражения цели, а цель задавалась в виде проекции на плоскость, перпендикулярную к траектории полета пули. При этом действительная форма БПЛА для упрощения вычислений заменялась эквивалентным прямоугольником, размеры которого зависят от расстояния до цели и ее пространственного положения.

В настоящей работе предлагается имитационная модель оценки эффективности противодействия БПЛА с помощью автоматических пушек, которая учитывает временные и точностные характеристики средства поражения для определения вероятности поражения цели, а также форму БПЛА и его движение в трехмерном пространстве.

Имитационная модель и исходные данные

Исходными для построения имитационной модели являются характеристики цели и средства противодействия. В качестве цели в модели рассматривается БПЛА типа «квадрокоптер», но в общем случае может быть задан БПЛА любого типа. Беспилотник представляет собой абсолютно твердое тело, которое состоит из набора параллелепипедов и эллипсоидов, жестко связанных с одной декартовой системой координат (СК) – локальной СК. Положение локальной СК в глобальной (мировой) СК определяется при помощи радиус-вектора центра локальной СК \mathbf{c} и матрицы поворота локальной СК относительно глобальной \mathbf{M} . Проекция БПЛА складывается из объединения проекций его составных частей. Для квадрокоптера проекция его на картинную плоскость состоит из четырех одинаковых эллипсоидов и одного параллелепипеда (рис. 1).

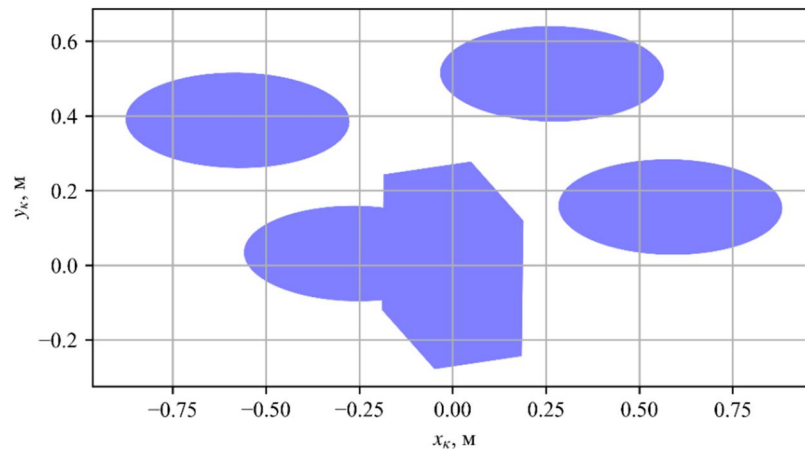


Рис. 1. Проекция БПЛА типа «квадрокоптер» на картинную плоскость

Движение БПЛА в модели представляет собой движение абсолютно жесткого тела в трехмерном пространстве, для которого траектория центра локальной СК описывается с помощью кривой Безье третьего порядка [7-9]. Кривая Безье строится по четырем точкам в пространстве \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} (рис. 2), где точки \mathbf{A} и \mathbf{D} являются начальной и конечной точками траектории.

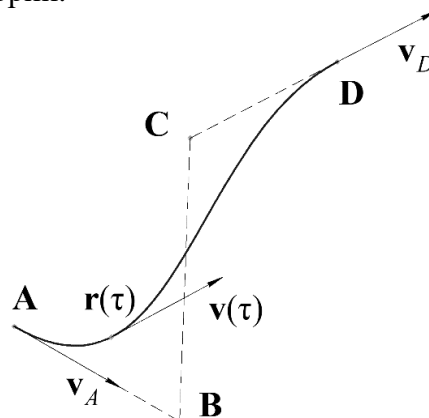


Рис. 2. Построение траектории БПЛА

Принимая, что в момент времени $t=t_0$ БПЛА находится в точке \mathbf{A} и имеет скорость \mathbf{v}_A , в момент времени $t=t_1$ он находится в точке \mathbf{D} и имеет скорость \mathbf{v}_D , а точки \mathbf{B} и \mathbf{C} определяются исходя из граничных условий по скоростям, получим параметрическую кривую вида:

$$\mathbf{r}(\tau) = (1 - \tau)^3 \mathbf{A} + \tau(1 - \tau)^2 \mathbf{B} + \tau^2(1 - \tau) \mathbf{C} + \tau^3 \mathbf{D}, \quad (1)$$

$$\tau(t) = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \hat{1} [0,1], \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} + \mathbf{v}_A \frac{t_1 - t_0}{3}, \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{D} - \mathbf{v}_D \frac{t_1 - t_0}{3}. \quad (4)$$

Движение по этой траектории предполагает, что векторы скорости \mathbf{v} и ускорения \mathbf{a} в каждый момент времени определяются по формулам (5) и (6):

$$\mathbf{v}(\tau) = \frac{3}{t_1 - t_0} \dot{\hat{\mathbf{e}}} (1 - \tau)^2 (\mathbf{B} - \mathbf{A}) + 2\tau(1 - \tau) (\mathbf{C} - \mathbf{B}) + \tau^2 (\mathbf{D} - \mathbf{C}) \ddot{\hat{\mathbf{e}}}, \quad (5)$$

$$\mathbf{a}(\tau) = \frac{6}{(t_1 - t_0)^2} \ddot{\hat{\mathbf{e}}} (\tau - 1) (\mathbf{B} - \mathbf{A}) + (1 - 2\tau) (\mathbf{C} - \mathbf{B}) + \tau (\mathbf{D} - \mathbf{C}) \dot{\hat{\mathbf{e}}}. \quad (6)$$

Изменение угловой ориентации локальной СК БПЛА во время движения может быть получено при помощи сферической интерполяции кватернионов [10]:

$$\mathbf{q}(\tau) = \frac{\sin(1 - \tau)\theta}{\sin \theta} \mathbf{q}_0 + \frac{\sin \tau\theta}{\sin \theta} \mathbf{q}_1, \quad (7)$$

$$\theta = \arccos \frac{\Re \mathbf{q}_0 \times \mathbf{q}_1}{\|\mathbf{q}_0\| \|\mathbf{q}_1\|}. \quad (8)$$

где \mathbf{q}_0 и \mathbf{q}_1 – кватернионы, определяющие угловую ориентацию локальной СК БПЛА в моменты времени t_0 и t_1 соответственно. Зная в определенный момент времени кватернион $\mathbf{q}(\tau) = (w, x, y, z)$, можно определить соответствующую матрицу поворота [11]:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \Re - 2y^2 - 2z^2 & 2xy - 2zw & 2xz + 2yw & \ddot{\hat{\mathbf{e}}} \\ \Im & 1 - 2x^2 - 2z^2 & 2yz - 2xw & \dot{\hat{\mathbf{e}}} \\ \hat{\mathbf{e}} & 2xz - 2yw & 2yz + 2xw & 1 - 2x^2 - 2y^2 \dot{\hat{\mathbf{e}}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Таким образом, в любой момент времени можно определить положение БПЛА и его ориентацию в пространстве.

Процесс противодействия БПЛА с помощью автоматических пушек заключается в обстреле квадрокоптера одиночными выстрелами или очередью.

Сам выстрел по цели в имитационной модели представляет собой материальную точку \mathbf{p}_r , которая движется прямолинейно с одинаковой скоростью \mathbf{v}_s (рис. 3) от точки выстрела \mathbf{p}_s до пересечения ее с текущей картинной плоскостью цели.

Если выстрел попал в проекцию БПЛА на эту плоскость, то считается, что произошло попадание в БПЛА.

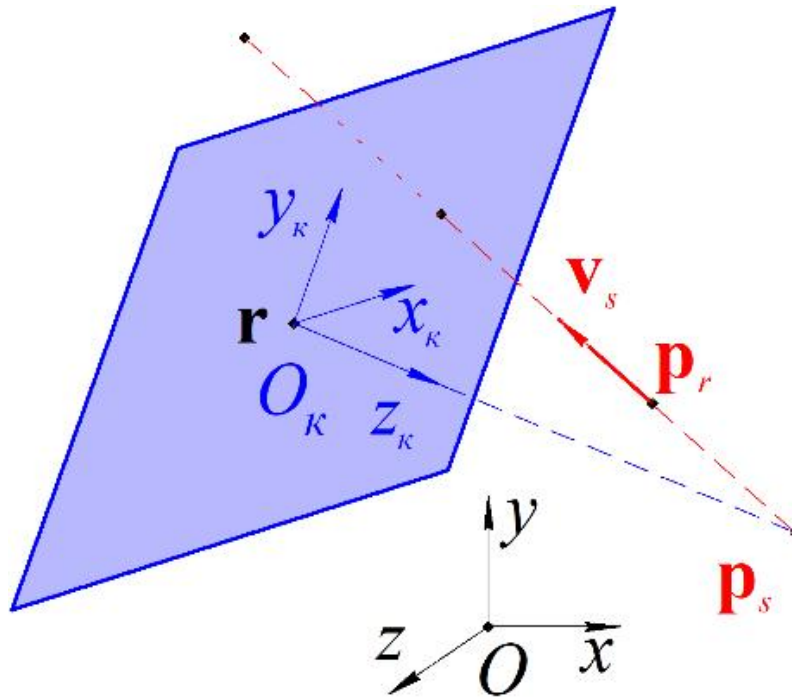


Рис. 3. К определению картинной плоскости

Следует отметить, что на эффективность поражения БПЛА большое влияние оказывает выбор точки прицеливания [3]. В разработанной модели траектория БПЛА заранее известна, что позволяет найти идеальную точку прицеливания в картинной плоскости в момент выстрела (рис. 4).

Алгоритм нахождения идеальной точки прицеливания при известной скорости полета снаряда строится как бы в обратную сторону по отношению к реальному процессу выстрела и попадания по цели и состоит из следующих этапов:

1) определение времени пересечения снаряда с картинной плоскостью. Это время есть не что иное как время попадания по БПЛА t_{hit} , которое можно найти как решение нелинейной функции расстояния от текущего положения снаряда до текущей картинной плоскости:

$$h(t) = (\mathbf{p}_r(t) - \mathbf{r}(t)) \times \mathbf{k}_k(t) = (\mathbf{p}_s + \mathbf{v}_s t - \mathbf{r}(t)) \times \frac{\mathbf{r}(t) - \mathbf{p}_s}{|\mathbf{r}(t) - \mathbf{p}_s|}, \quad (10)$$

$$h(t_{hit}) = 0. \quad (11)$$

2) нахождение точки наилучшего попадания; в момент t_{hit} строится проекция БПЛА, и точка наилучшего попадания на этой проекции определяется как «центр масс» проекции:

$$\mathbf{r}_c = \frac{1}{S} \int_S \mathbf{r} dS. \quad (12)$$

3) нахождение точки наилучшего прицеливания; на этом этапе находится пересечение луча, исходящего из точки \mathbf{p}_s и проходящего через точку \mathbf{r}_c , с картинной плоскостью в момент выстрела:

$$\mathbf{p}_{aim} = \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{p}_s) \times \mathbf{k}_k}{\frac{\mathbf{r}_c - \mathbf{p}_s}{|\mathbf{r}_c - \mathbf{p}_s|} \times \mathbf{k}_k}, \quad (13)$$

Где \mathbf{p}_{aim} – идеальная точка прицеливания, лежащая на картинной плоскости в момент выстрела.

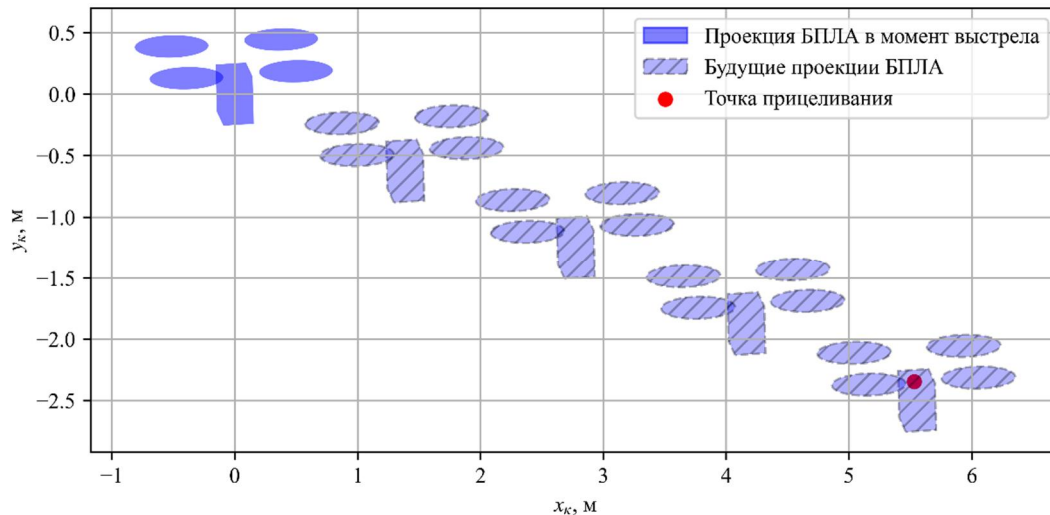


Рис. 4. К определению идеальной точки прицеливания

Обстрел БПЛА одиночными выстрелами в имитационной модели разыгрывается путем генерации координат точек попадания, распределенных по нормальному закону, в картинной плоскости цели с учетом ошибок стрельбы, определяемых средством противодействия и зависящих от расстояния до цели. Точкой прицеливания является идеальная точка прицеливания, алгоритм нахождения которой описан выше. Функция плотности вероятности в таком случае записывается в виде:

$$f(x_k, y_k) = \frac{1}{2\pi\sigma_h^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_h^2} \left[(x_k - p_{aim,x})^2 + (y_k - p_{aim,y})^2 \right]\right\} \quad (14)$$

$$\sigma_h = \sigma h / 1000, \quad (15)$$

где $p_{aim,x}$ и $p_{aim,y}$ – координаты точки прицеливания в картинной плоскости; σ – среднее квадратическое отклонение выстрела на расстоянии 1000 м.

Время между одиночными выстрелами Δt является случайной величиной, имеющей показательный закон распределения. Функцию распределения плотности вероятности можно записать в виде:

$$f(\Delta t) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{\Delta t}{\beta}}, \quad \Delta t > 0, \quad (16)$$

где β – среднее время между выстрелами.

При стрельбе очередь после определения координат идеальной точки прицеливания сначала на картинной плоскости цели определяется случайная точка $\mathbf{p}_{СТП}$, которая будет являться средней точкой попадания (СТП) для выстрелов текущей очереди. Центр распределения находится в точке прицеливания, а отклонения по осям равны между собой и зависят от расстояния до БПЛА. Функция плотности вероятности в этом случае записывается в виде:

$$f(x_k, y_k) = \frac{1}{2\pi\sigma_{СТП,h}^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{СТП,h}^2} \left[(x_k - p_{aim,x})^2 + (y_k - p_{aim,y})^2 \right]\right\} \quad (17)$$

$$\sigma_{СТП,h} = \sigma_{СТП} h / 1000, \quad (5)$$

где $p_{aim,x}$ и $p_{aim,y}$ – координаты точки прицеливания в картинной плоскости; $\sigma_{СТП}$ – среднее квадратическое отклонение СТП на расстоянии 1000 м.

После этого для каждого выстрела очереди на картинной плоскости по нормальному закону разыгрываются случайные точки. Центр распределения отдельных выстрелов текущей очереди находится в точке $\mathbf{p}_{СТП}$, а отклонения по осям также равны

между собой и зависят от расстояния до БПЛА. Функция плотности вероятности в таком случае записывается в виде:

$$f(x_k, y_k) = \frac{1}{2\pi\sigma_h^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_h^2} \left[(x_k - p_{СПП,x})^2 + (y_k - p_{СПП,y})^2 \right]\right\} \quad (18)$$

где $p_{СПП,x}$ и $p_{СПП,y}$ – координаты СПП в картинной плоскости, а σ_h определяется формулой (15).

Время между последним выстрелом предыдущей очереди и первым выстрелом новой разыгрывается по показательному закону:

$$f(Dt_q) = \frac{1}{\beta_q} e^{-\frac{Dt_q}{\beta_q}}, \quad Dt_q > 0, \quad (19)$$

где β_q – среднее время между очередями, а интервалы между выстрелами одной очереди полагаются постоянными и одинаковыми.

Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования для случая обстрела единичными выстрелами одного или нескольких квадрокоптеров одной или несколькими пушками путем оценки доли долетевших до конечной точки дронов.

Моделирование проводилось в трехмерном пространстве в прямоугольной области. Каждый беспилотник в модели создавался в случайной точке пространства: $x_0 = -4000$ м; y_0 из промежутка $[-500, 2500]$ м; z_0 из промежутка $[-4000, 4000]$ м. Для каждого БПЛА разыгрывалась случайная точка в пространстве, куда он должен долететь – конечная точка. Она располагалась в случайной точке пространства: $x_1 = 4000$ м; y_1 из промежутка $[-500, 2500]$ м; z_1 из промежутка $[-4000, 4000]$ м. Остальные начальные данные, параметры и характеристики БПЛА также имеют случайный характер. По разыгранным конкретным значениям параметров для каждого БПЛА строилась траектория в виде кривой Безье 3-го порядка. Примеры получившихся траекторий для дронов приведены на рис. 5.

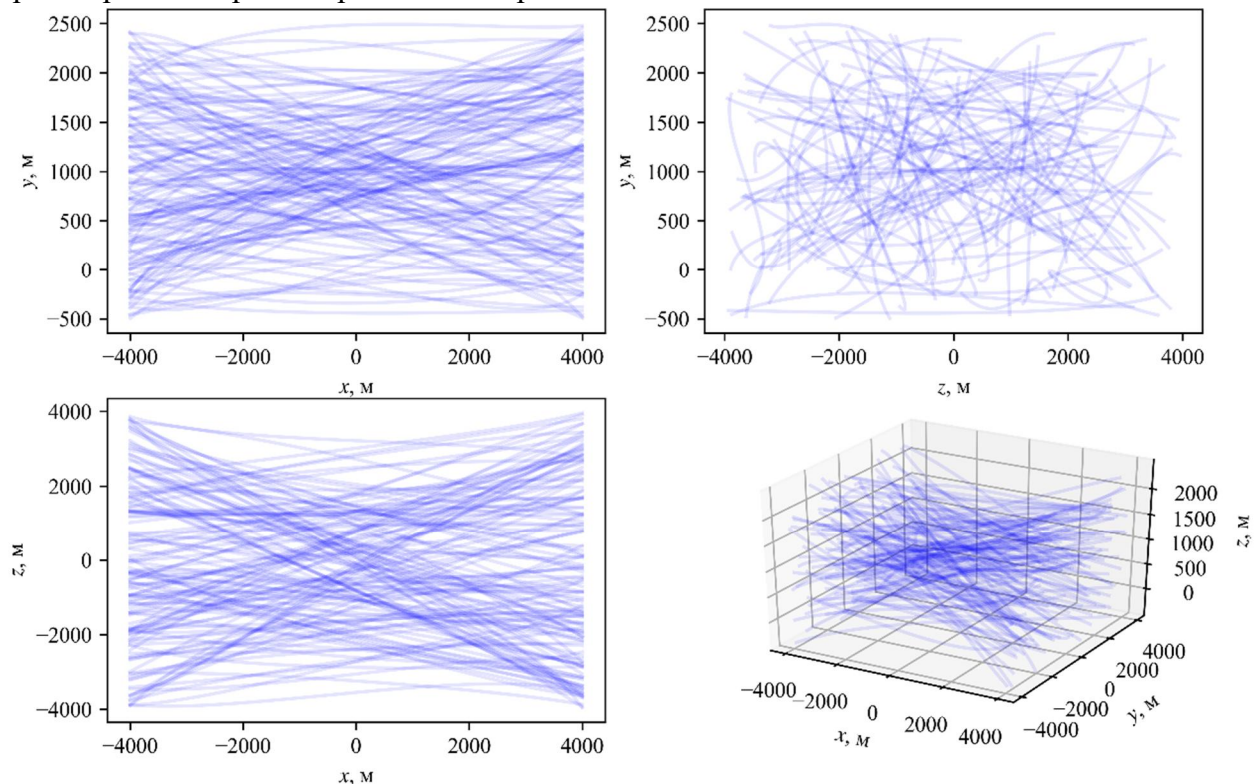


Рис. 5. Траектории БПЛА в модельном случае

Результаты моделирования в виде зависимости доли долетевших до заданной конечной точки БПЛА от точности и скорострельности пушек представлены на рис. 6 для нескольких вариантов количественного соотношения БПЛА и пушек.

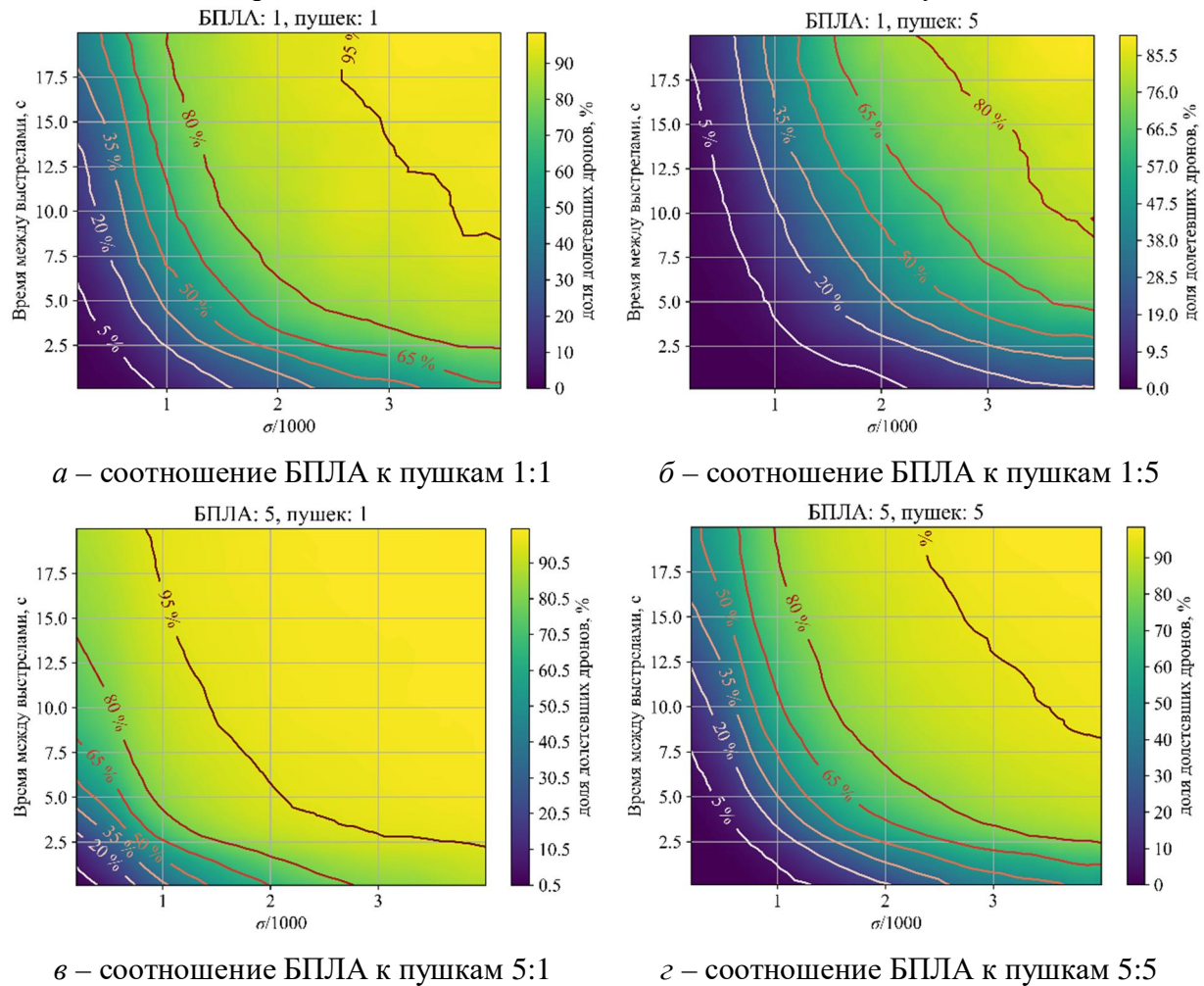


Рис. 6. Результаты моделирования

Выводы

Предложен подход к оценке эффективности противодействия БПЛА средствами огневого поражения, который можно масштабировать по параметрам «число дронов» и «число пушек» в различных комбинациях. Помимо этого, разработанный подход обладает достаточной полнотой и гибкостью, позволяя рассматривать в качестве оружия различные образцы при их известных ошибках стрельбы. Особое внимание в работе уделено моделированию траектории движения и заданию формы БПЛА, что позволяет исследовать противодействие беспилотникам различных типов.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06090 мк.

Литература

1. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов / В.О. Егурнов, В.В. Ильин, М.И. Некрасов, В.Г. Сосунов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1-2 (115-116). С. 51-58.

2. **Макаренко С.И.** Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 3. Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 101-175.
3. **Макаренко С.И., Тимошенко А.В.** Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147-197.
4. **Макаренко С.И.** Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 122-157.
5. Оценка эффективности систем противодействия массированному применению мини - БПЛА: методические основы / А.С. Гусева, Р.А. Дурнев, А.С. Кудряшов, Е.В. Свиридок // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1(116). С. 57-61.
6. **Racek F., Baláž T., Krejčí J., Procházka S., Macko M.** Tracking, aiming, and hitting the UAV with ordinary assault rifle // Proc. SPIE 10441, Counterterrorism, Crime Fighting, Forensics, and Surveillance Technologies, 104410C.
7. **Arribas E., Mancuso V., Cholvi V.** Coverage Optimization with a Dynamic Network of Drone Relays // IEEE Trans. Mob. Comput. IEEE, 2020. Vol. 19, № 10. P. 2278–2298.
8. **Sabetghadam B., Cunha R., Pascoal A.** Real-time trajectory generation for multiple drones using bézier curves // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53. P. 9276–9281.
9. **Zhang J.** Occlusion-aware UAV path planning for reconnaissance and surveillance in complex environments // IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2019. 2019. № December. P. 1435–1440.
10. **Vince J.** Quaternions for Computer Graphics. Springer-Verlag London, 2011. 140 p.
11. **Голубев Ю.Ф.** Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013, 039. 23 с.