

УДК 004.942

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПОРАЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Быков Н.В., Федулов В.А. (Москва)

Введение

Малоразмерные БПЛА на сегодняшний день применяются в различных сферах человеческой деятельности. Они используются для мониторинга окружающей среды, городских транспортных потоков, для разведки местности в зонах стихийных бедствий и/или чрезвычайных ситуаций, для доставки товаров и услуг и т. д. [1]. Такое широкое распространение малоразмерные БПЛА получили за счёт своей компактности, применяемых материалов (в основном, пластмасс), технического прогресса в развитии микроэлектроники, электротехники, а также за счёт относительно малой стоимости в условиях массового производства. Кроме того, БПЛА обладают малой заметностью ввиду малости своих размеров и производят немного шума, поскольку используют электрические двигатели. Однако малоразмерные БПЛА могут применяться и в преступных целях [2]. Например, для контрабанды, шпионажа, нарушения общественного порядка, совершения терактов и т. д. Возможности и сценарии преступного использования БПЛА развиваются одновременно с развитием БПЛА.

В данной статье речь идёт о малоразмерных беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) типа «коптер» (рис. 1) массой от десятков граммов до единиц килограммов с габаритными размерами порядка метра. Такие БПЛА в качестве полезной нагрузки могут брать аппаратуру для записи аудио- и видеoinформации или любой груз массой до килограмма.

За последние годы малоразмерные БПЛА получили широкое распространение в военной сфере. Вооружённый конфликт в Нагорном Карабахе в 2019 году показал, какое преимущество могут дать такие БПЛА на поле боя при грамотной тактике их применения. С тех пор роль БПЛА в различных военных конфликтах продолжает расти [3]. Основное применение малых БПЛА – разведка местности. Также они применяются для наведения и корректировки артиллерийского огня. Помимо БПЛА типа «коптер» (рис. 1) на поле боя применяется такая разновидность БПЛА, как барражирующие боеприпасы (БП) (рис. 2).

Ещё более серьёзным вызовом станет появление организованных автономных групп (объединений, стай и т. д.) БПЛА [4,5]. Будучи способными распределять роли между членами группы, обладая лучшей ситуационной осведомлённостью ввиду взаимного обмена информацией и способностью адаптироваться к условиям окружающей обстановки в режиме реального времени, такие формирования станут неуязвимыми для существующих систем борьбы с летательными аппаратами (ЛА).

Проблема определения способов эффективной борьбы с малоразмерными БПЛА и разработкой эффективных систем для их поражения как в условиях боевых действий, так и в условиях мирного времени на сегодняшний день не решена. Необходимо создавать системы обнаружения, способные замечать малоразмерные цели с малой величиной эффективной площади рассеяния (ЭПР), и различные средства поражения, т. к. имеющиеся системы и средства крайне неэффективны в борьбе против современных малоразмерных БПЛА [6].



Рис. 1. Пример малоразмерного БПЛА



Рис. 2. Барражирующий боеприпас ZALA Lancet (Россия)

Наиболее вероятно, что любая система поражения малоразмерных БПЛА и их групп будет являться сложной технической системой, ведь существует множество способов обнаружения и вывода БПЛА из строя. Следовательно, потенциально существует большое множество различных технических решений, касающихся состава и пространственной структуры системы противодействия БПЛА, параметров её подсистем и элементов. Под составом системы подразумевается конечное множество элементов системы с определёнными тактико-техническими характеристиками (ТТХ). Под пространственной структурой – расположение элементов системы в пространстве и их взаимосвязь друг с другом.

В данной статье представлено краткое описание разработанной имитационной модели (ИМ) системы поражения малоразмерных БПЛА, в основе которой лежит метод дискретно-событийного моделирования (ДСМ). С использованием созданной ИМ может быть решена задача структурного синтеза системы поражения при заданном множестве вариантов ТТХ её компонентов. В результате решения задачи получается пространственная структура системы поражения, обеспечивающая наиболее эффективное противодействия БПЛА при заданных условиях. В качестве способа оптимизации применён генетический алгоритм (ГА).

Модель системы поражения

Система поражения малоразмерных БПЛА – ИМ, которой рассматривается в данной работе, состоит из подсистемы обнаружения и подсистемы поражения (нейтрализации) целей. Модель системы поражения как целого отвечает за обеспечение взаимосвязи моделей её элементов. Например, при обнаружении цели подсистемой обзора окружающего пространства система активирует подсистему поражения (нейтрализации). Последняя, в свою очередь, при уничтожении цели посылает сигнал о необходимости её исключения из списка обнаруженных целей.

Модель подсистемы обнаружения представлена моделью радиолокационной станции (РЛС), в состав которой входят несколько радарных антенн и обнаружитель полезного радиолокационного сигнала. Факт обнаружения цели устанавливается по критерию Неймана–Пирсона. Каждая радарная антенна описывается следующим набором параметров, формирующих вектор \mathbf{A} :

- x_a, y_a, z_a – координаты расположения;
- φ_a – угол обзора по азимуту: $0 \leq \varphi_a \leq 2\pi$;
- $\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$ – диапазон угла возвышения: $-\pi/2 \leq \varepsilon_{\min} < \varepsilon_{\max} \leq \pi/2$;
- φ_{a0} – начальный угол азимута;
- ω_a – угловая скорость вращения;

- $r_{a \min}, r_{a \max}$ – сектор обзора по дальности.

Таким образом:

$$\mathbf{A} = (x_a, y_a, z_a, \varphi_a, \varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}, \varphi_{a0}, \omega_a, r_{a \min}, r_{a \max}). \quad (1)$$

Вектор параметров обнаружителя \mathbf{D} имеет следующий вид:

$$\mathbf{D} = (p_{fa}, p_{cd}, U_d, \sigma_U, \sigma_{noise}), \quad (2)$$

где p_{fa} – вероятность ложной тревоги; p_{cd} – вероятность правильного обнаружения; U_d – средняя величина выходного напряжения при наличии сигнала от цели; σ_U – среднее квадратическое отклонение (СКО) выходного напряжения при наличии сигнала от цели; σ_{noise} – СКО в отсутствие полезного сигнала.

Модель подсистемы нейтрализации целей отвечает за распределение целей между отдельными средствами противодействия, входящими в её состав. Средства противодействия представлены моделями стрелкового оружия, автоматических пушек и т. п. Средства противодействия способны перемещаться в пространстве.

Каждое средство воздействия описывается следующими параметрами, формирующими вектор \mathbf{G} :

- x_g, y_g, z_g – координаты расположения в пространстве. Оси Ox и Oz лежат в горизонтальной плоскости, ось Oy вертикальна;
- c_m – ёмкость магазина (ленты);
- s – скорострельность;
- b – длина очереди;
- Δt_r – время перезарядки;
- τ_b – среднее время между очередями. Время между очередями Δt_b является случайной величиной, распределённой по экспоненциальному закону;
- Σ_a – ковариационная матрица точки прицеливания относительно идеальной точки прицеливания;
- Σ_b – ковариационная матрица средней точки попаданий (СТП) в очереди;
- Σ_{ind} – ковариационная матрица отдельных выстрелов относительно СТП или точки прицеливания.

Тогда в общем случае

$$\mathbf{G} = (x_g, y_g, z_g, c_m, s, b, \Delta t_r, \tau_b, \Sigma_a, \Sigma_b, \Sigma_{ind}). \quad (3)$$

Также разработаны модели программируемых БП с осевым и радиальным разлётом поражающих элементов (ПЭ). Такие БП считаются перспективными для борьбы с малоразмерными ЛА [7]. Каждое средство воздействия может использовать один из вариантов средства поражения, например, программируемые снаряды с осевым или радиальным разлётом ПЭ или обычные пули. В общем случае средство поражения может быть описано следующими параметрами:

- m_p – массой;
- v_p – средней скоростью на траектории;
- σ_v – СКО начальной v_{p0} или средней v_p скорости;
- τ_d – СКО ошибки времени срабатывания у цели;
- k_t – коэффициентом мощности воздействия на цель;
- r_0 – радиусом зоны безусловного поражения;
- d_p – расчётной дальностью срабатывания относительно цели;
- α_{ax} – углом осевого разлёта ПЭ: $0 \leq \alpha_{ax} \leq \pi/2$;
- φ_1 и φ_2 – углами поля радиального разлёта ПЭ: $0 \leq \varphi_1 < \varphi_2 \leq \pi$.

Конкретный набор параметров зависит от типа средства поражения. Ударный БП типа пули описывается следующим вектором параметров:

$$\mathbf{P}_s = (m_p, v_p, \sigma_v). \quad (4)$$

Вектор параметров аксиального БП:

$$\mathbf{P}_{ax} = (m_p, v_p, \sigma_v, \tau_d, k_f, r_0, d_p, \alpha_{ax}). \quad (5)$$

Вектор параметров средства поражения с радиальным разлётом ПЭ:

$$\mathbf{P}_{rad} = (m_p, v_p, \sigma_v, \tau_d, k_f, r_0, d_p, \varphi_1, \varphi_2). \quad (6)$$

Способ установления факта поражения цели зависит от типа используемого БП. В случае простых пуль для поражения цели считается достаточным хотя бы одно попадание в её проекцию на картинную плоскость. Картинная плоскость – это плоскость, проходящая через центр масс БПЛА и перпендикулярная линии визирования «оружие – цель». В случае БП со множеством ПЭ используется координатный закон поражения [7].

Одной из особенностей ИМ является учёт охраняемых (запретных) зон. Такие зоны могут соответствовать, к примеру, объектам критической инфраструктуры. Падение БПЛА в такую зоны считается опасным событием.

Модель малоразмерного беспилотного летательного аппарата

Модель БПЛА представляет собой набор простых трёхмерных тел (параллелепипедов, эллипсоидов и т. д.), аппроксимирующих реальную геометрию ЛА. Траектория полёта БПЛА моделируется кривой Безье третьего порядка. Такой подход широко применяется в исследованиях, связанных с движением БПЛА в пространстве [8].

При движении по гладкой траектории ориентация БПЛА в пространстве изменяется непрерывно. По заданным в точка А и D матрицам поворота системы координат, связанной с ЛА, путём сферической интерполяции кватернионов в любой момент времени τ рассчитывается матрица поворота.

Модели БПЛА в процессе моделирования способны изменять конечную точку траектории. Это позволяет моделировать сценарии, в которых БПЛА способны атаковать систему поражения, выводя из строя её компоненты. Также это позволяет реализовать сложное поведение агентов, управляющих моделями БПЛА.

Таким образом, разработанная ИМ учитывает перемещение БПЛА в трёхмерном пространстве, его геометрию и изменение его ориентации в пространстве при движении по траектории. Этим обеспечивается возможность построения проекции БПЛА на картинную плоскость для установления факта его поражения. Более подробное описание модели БПЛА приведено в статье [7].

Методы моделирования

В основе разработанной ИМ лежит подход ДСМ. Состояние моделей изменяется при наступлении определённых событий, которые эти модели ожидают. Посредством событий реализовано и взаимодействие моделей между собой (передача сообщений). Такое взаимодействие объектов позволяет реализовать сложное поведение агентов, приводя к парадигме агентно-ориентированного программирования.

Поскольку в ИМ большое число процессов являются стохастическими, то для получения тех или иных оценок, расчёта показателей и критериев необходимо накапливать и обрабатывать статистику, запуская ИМ несколько раз при различных начальных условиях. Тем самым реализуется метод Монте–Карло.

Для решения задачи структурного синтеза системы поражения БПЛА разработан вещественный ГА, подробно описанный далее.

Программно ИМ реализована на языке программирования Python 3 с использованием библиотеки для ДСМ SimPy [9].

Задача структурного синтеза системы поражения

Задача структурного синтеза системы поражения малоразмерных БПЛА сформулирована следующим образом. Имеется множество возможных вариантов ТТХ радарных антенн \mathbf{A}_i , обнаружителей \mathbf{D}_j , средств нейтрализации \mathbf{G}_k и снарядов \mathbf{P}_{sl} , $\mathbf{P}_{ax\ m}$, $\mathbf{P}_{rad\ n}$, где $i, j, k, l, m, n = 1, 2, \dots$ соответствуют вариантам ТТХ соответственно антенн, обнаружителей, средств противодействия и БП. Дополнив вектор \mathbf{G} векторами (4)–(6), получим варианты средств противодействия, использующих в качестве средства поражения аксиальный или радиальный БП или БП типа пули: $\mathbf{G}_{ax} = \mathbf{G} \oplus \mathbf{P}_{ax}$, $\mathbf{G}_{rad} = \mathbf{G} \oplus \mathbf{P}_{rad}$, $\mathbf{G}_s = \mathbf{G} \oplus \mathbf{P}_s$ соответственно (индексы вариантов для простоты опущены).

Требуется выбрать из указанных множеств варианты характеристик \mathbf{p} элементов системы поражения и разместить эти элементы в пространстве так, чтобы обеспечить наибольшую эффективность системы противодействия БПЛА, т. е. обеспечить максимальное значение заданного показателя эффективности E :

$$(\mathbf{p}^*, \mathbf{c}^*) = \arg \max_{\mathbf{p} \in P, \mathbf{c} \in C} E(\mathbf{p}, \mathbf{c}),$$

при ограничении на возможные значения координат элементов:

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}, \\ y_{\min} \leq y_i \leq y_{\max}, \\ z_{\min} \leq z_i \leq z_{\max}, \end{cases}$$

где \mathbf{p} – набор элементов системы с определённым вариантом ТТХ; P – множество всех возможных вариантов ТТХ элементов: $P = \{\mathbf{p}_i\}_{i=1}^N$;

$(x_i \ y_i \ z_i) = \mathbf{c}_i \in C = \{\mathbf{c}_i\}_{i=1}^N$ – координаты i -го элемента системы; N – общее число элементов сформированной системы, которое явно не ограничивается. В результате решения задачи алгоритм оптимизации должен выдать список элементов системы с указанием вариантов их ТТХ и координатам расположения.

В качестве алгоритма поисковой оптимизации выбран ГА, т. к. он годится для решения многопараметрических нелинейных задач оптимизации с ограничениями [10]. Данная задача, строго говоря, не является многопараметрической. Далее будет показано, что оптимизация производится всего по трём параметрам: двум координатам (x и z) и варианту ТТХ. Однако разработанная ИМ может применяться не только для структурного, но и для структурно-параметрического синтеза, при котором количество варьируемых параметров модели может составлять десятки, в пределе достигая суммарного количества различных компонентов векторов (1)–(6).

Генетический алгоритм

Каждая хромосома (особь) \mathbf{X} в общем случае состоит из набора нескольких генов \mathbf{G}_s , \mathbf{G}_{ax} , \mathbf{G}_{rad} , \mathbf{A} и одного гена \mathbf{D} : $\mathbf{X} = (\mathbf{G}_{ax1}, \mathbf{G}_{rad1}, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{D}, \dots)$.

Одной из основных частей любого ГА является функция приспособленности F . Очевидно, что использование в качестве F только лишь показателя эффективности E приведёт к тому, что ГА начнёт помещать в гены неограниченное количество элементов. В действительности требуется создать эффективную систему при

минимальных издержках. В контексте данной работы это значит, что необходимо обеспечить наибольшую эффективность при наименьшем числе элементов. Исходя из этого, сформирована такая функция приспособленности, у которой положительным фактором является показатель эффективности E , а отрицательным (штрафуемым) – условная стоимость системы. Условная стоимость в данном случае есть количество задействованных элементов системы. Функция приспособленности в таком случае имеет следующий вид:

$$F = \begin{cases} E - \gamma(N - N_{\text{ref}}), & \text{при } N > N_{\text{ref}}, \\ E, & \text{при } N \leq N_{\text{ref}}, \end{cases}$$

где γ – штрафной коэффициент, $\gamma > 0$; N_{ref} – максимальное число элементов системы, при котором штрафная функция отсутствует. Функция F составлена из безразмерных величин.

Применён подход ГА с вещественным кодированием (Real-Coded Genetic Algorithm – RCGA) и схема скрещивания для RCGA, аналогичная описанной в монографии [11]. Данный выбор обусловлен тем, что большинство параметров, описывающих модель системы поражения, являются вещественными числами. Преобразование их к двоичному виду сопряжено с резким увеличением необходимой оперативной памяти компьютера.

Новое значение вещественного параметра с непрерывной величиной у потомка родителей 1 и 2 является случайной величиной, распределённой по нормальному закону с математическим ожиданием

$$M[x] = \frac{g_1 + g_2}{2}$$

и СКО

$$\sigma[x] = \frac{M[x] - \min(g_1, g_2)}{3(1-\alpha)},$$

где g_1 и g_2 – значения соответствующего параметра (элемента какого-либо вектора (1)–(6)) у родителей 1 и 2; α – параметр, определяющий вероятность выхода значения гена потомка за пределы отрезка $[g_1; g_2]$ (см. рис. 3).

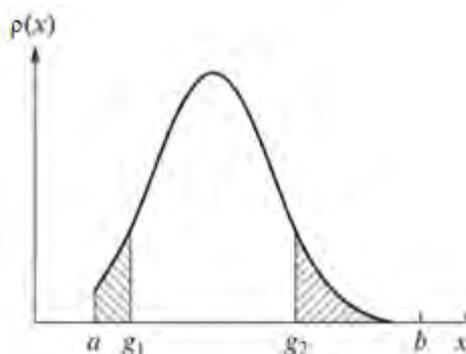


Рис. 3. Функция плотности вероятности гена-потомка при кроссовере [11]

Функция плотности вероятности нормального распределения ρ определена на отрезке $x \in [a; b]$, $a \leq g_1 < g_2 \leq b$, и нормирована:

$$\int_a^b \rho(x) dx = 1, \int_{-\infty}^a \rho(x) dx = \int_b^{+\infty} \rho(x) dx = 0.$$

Дискретные параметры с конечным множеством значений кодируются натуральными числами (индексами) $s \in [0; N_v) \subset \mathbb{N}$, где N_v – число вариантов ТТХ.

Ген с дискретным параметром при скрещивании заменяется геном со случайным индексом, находящимся между индексами родительских генов.

При мутации вещественного гена получается новый ген того же типа со случайным значением согласно нормальному распределению с характеристиками

$$M[x] = g, \quad \sigma[x] = \frac{b-a}{6}\beta,$$

где g – значение гена до мутации; β – параметр, определяющий ширину распределения.

Ген с дискретным параметром при мутации заменяется геном со случайным индексом из всего диапазона индексов за исключением текущего.

Для скрещивания из популяции случайным образом с вероятностью пропорциональной приспособленности выбираются две особи. Если в результате скрещивания получается особь с худшей приспособленностью во всей популяции, то такая особь не добавляется в популяцию. В противном случае она заменяет наименее приспособленную особь.

Кроссовер генов состоит из следующих этапов:

1. Выбираются две хромосомы X_1 и X_2 .
2. Разыгрывается случайное число, равномерно распределённое от 0 до 1, которое определяет места разделения хромосом-родителей на две части.
3. Полученные четыре части хромосом попарно соединяются в две новые хромосомы X_3 и X_4 .
4. Структуры полученных хромосом проходят проверку на валидность. Приемлемые структуры определяются, исходя из начальных условий. Если хромосома не валидна, то она не принимается и алгоритм повторяется с п. 2.
5. Выбирается случайная хромосома-потомок X_3 или X_4 , которая определяет структуру итоговой хромосомы-потомка для всей операции кроссовера.

В итоге происходит кроссовер соответствующих генов, в результате которого образуется хромосома X_5 .

Мутация хромосомы X_5 происходит по следующему алгоритму:

1. Производится розыгрыш случайного числа, распределённого равномерно от 0 до 1.
2. Если полученное число больше 0,5, то в конец структуры добавляется случайный элемент со случайными параметрами.
3. В противном случае из структуры удаляется случайный элемент.
4. Полученная структура проходит проверку на валидность. Если структура не валидна, то мутация происходит сначала. Иначе мутировавшая хромосома принимается.

С заданной вероятностью может произойти мутация популяции, заключающаяся в замене одного или нескольких генов одним или несколькими случайными генами, что совместно с эффектом мутации особей может способствовать выходу алгоритма из локальных экстремумов.

Результаты

Ниже представлены результаты, полученные при следующих исходных данных: число итераций ГА – 350; число прогонок ИМ для накопления статистики в каждой итерации ГА – 100; вероятность мутации популяции – 0,02; размер начальной популяции – 32 особи; максимальный размер популяции – 40 особей; $\gamma = 0,1$; $N_{\text{ref}} = 3$;

$\alpha = 0,2$; $\beta = 1$. БПЛА в количестве $N_d = 10$ летели слева направо (рис. 4 и 5) из области в районе $x = -2000$ м в область в районе $x = 2000$ м симметричным по оси Oz фронтом шириной 3000 м. Высота полёта – от 10 м до 100 м. Ограничения координат размещения элементов системы поражения имели следующие значения: $x_{\min} = -1500$ м, $x_{\max} = 1500$ м, $y_{\min} = y_{\max} = 0$, $z_{\min} = -1500$ м, $z_{\max} = 1500$ м.

На рис. 4 и 5 показаны результаты в случае, когда показателем эффективности E служит вероятность уничтожения всех целей:

$$E_1 = N_{dd}/N_d,$$

где N_{dd} – число уничтоженных БПЛА. На рисунках ниже синими прямоугольниками обозначены запретные (защищаемые) зоны. На рис. 4 показан график сходимости ГА. На рис. 5 – полученная структура системы поражения БПЛА. Запретные зоны в случае показателя E_1 значения не имели.

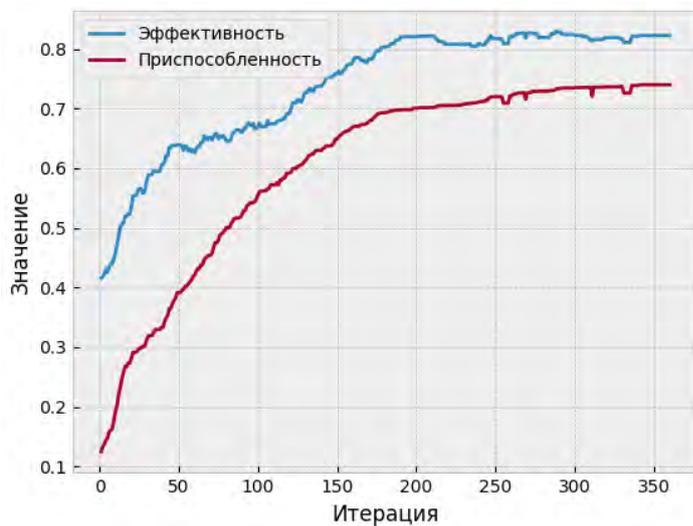


Рис. 4. Средняя эффективность и приспособленность популяции в случае E_1

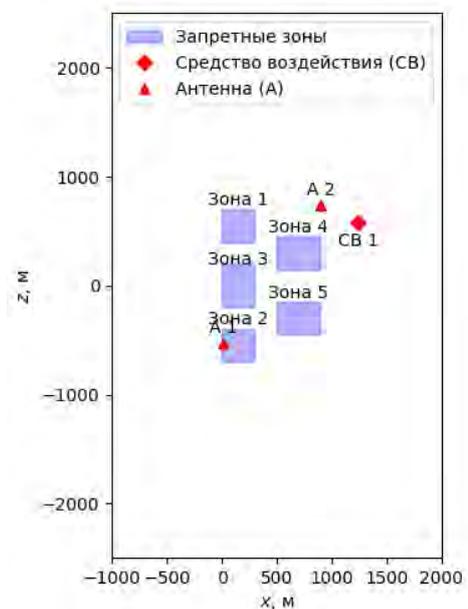


Рис. 5. Итоговая структура системы поражения в случае E_1

На следующих ниже рисунках показаны результаты, полученные при показателе эффективности, учитывающем как долю уничтоженных целей N_{dd}/N_d , так и долю сбитых БПЛА N_{fa}/N_{dd} , упавших в запретные зоны:

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + N_{fa}/N_{dd}}.$$

На рис. 6 показан график сходимости ГА. На рис. 7 – полученная структура системы поражения БПЛА.

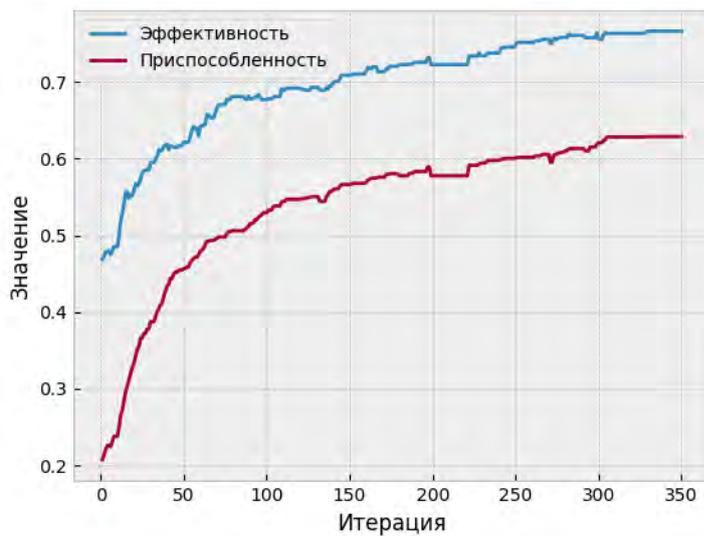


Рис. 6. Средняя эффективность и приспособленность популяции в случае E_2

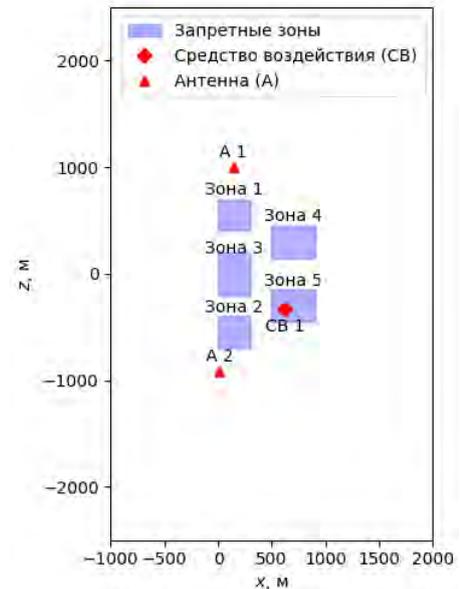


Рис. 7. Итоговая структура системы поражения в случае E_2

Графики на рис. 4 и 6 свидетельствуют о сходимости ГА к некоторому максимуму функции приспособленности и показателя эффективности. В то же время из рис. 5 и рис. 7 видно, что результаты при E_1 и E_2 заметно отличаются, что можно объяснить следующим образом. В случае E_2 запретные зоны влияют на показатель эффективности, вследствие чего ГА так подбирает структуру системы, чтобы обеспечить защиту зон. В этом случае логично ожидать получение системы противодействия с симметричной структурой. На рис. 7 ожидаемая симметричность прослеживается. Вероятно, увеличение числа итераций и/или вероятности мутации популяции приведут к более симметричной картине. В первом же случае запретные зоны не учитываются показателем эффективности, но БПЛА в среднем движутся симметрично относительно оси $z = 0$, поэтому здесь также логично было бы ожидать получение симметричной структуры системы. Скорее всего, в данном случае ГА попал в локальный экстремум целевой функции. Возможно, большая вероятность мутации популяции и/или большее число итераций смогли бы вывести алгоритм из этой точки. Более того, запретные зоны расположены симметрично всегда, что является гораздо более сильным условием, чем симметричность случайных траекторий БПЛА в среднем. В последнем случае при прочих равных условиях понадобится больше прогонок ИМ для получения более симметричной итоговой структуры. Тем не менее, антенны 1 и 2 на рис. 5 расположены по разные стороны оси $z = 0$, что может говорить о найденном ГА тренде на симметричность системы.

В любом случае, сходимость любого ГА к глобальному экстремуму не доказана. Однако после получения результатов работы ГА становится возможным провести оптимизацию пространственной структуры системы противодействия другими методами оптимизации, например, методом прямого перебора заданного множества значений.

Время расчёта для каждого случая составило примерно 5 часов.

Заключение

Разработанная ИМ для оценки эффективности системы поражения малоразмерных БПЛА может использоваться для решения задач структурного синтеза таких систем. Исходя из заданного множества различных вариантов ТТХ элементов

системы (средств нейтрализации, поражения и обнаружения целей), путём поисковой оптимизации с применением ГА получается итоговая пространственная структура системы противодействия, обладающая высоким уровнем эффективности.

В дальнейшем планируется применить разработанный ГА в задаче структурно-параметрического синтеза системы поражения БПЛА.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-29-06090 мк.

Литература

1. **Abualigah L. et al.** Applications, Deployments, and Integration of Internet of Drones (IoD): A Review // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Vol. 21, № 22. – P. 25532–25546.
2. Демьянович М.А. Использование беспилотных летательных аппаратов в преступных целях: методы противодействия и борьбы // *Правопорядок: история, теория, практика*. – 2019. – № 2 (21). – С. 108–111.
3. **Modebadze V.** The importance of drones in modern warfare and armed conflicts // *Journal of Social Sciences and Arts*. – 2021. – Vol. 1, № 2. – P. 89–98.
4. **Абросимов В.К.** Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов: монография. – М.: Издательский Дом «Наука», 2017. – 304 с.
5. **Zieliński T.** Factors Determining a Drone Swarm Employment in Military Operations // *Safety & Defense*. – 2021. – Vol. 1. – P. 59–71.
6. **Макаренко С.И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам: Монография. – СПб.: Научные технологии, 2020. – 204 с.
7. **Федулов В.А.** Имитационная модель для оценки эффективности противодействия дронам стрелковым оружием // *Проблемы развития стрелковой отрасли в Российской Федерации: материалы II Всероссийской научно-практической конференции*. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2023. – С. 145–153.
8. **Song B., Qi G., Xu L.** A Survey of Three-Dimensional Flight Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle // *Proceedings of the 31st Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2019*. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 5010–5015.
9. *simpy*. PyPI [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/simpy/> (дата обращения: 25.09.2023).
10. **Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V.** A review on genetic algorithm: past, present, and future // *Multimedia Tools and Applications*. – 2021. – Vol. 80, № 5. – P. 8091–8126.
11. **Быков Н.В.** Внутрикамерные процессы, параметрический и структурный синтез газодинамических баллистических установок. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. – 224 с.