



Бердонос В. Д., Журавлёв Д. О., Зау Хтет Наинг
V. D. Berdonosov, D. O. Zhuravlev, H. N. Zaw

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ БПЛА**

**DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM AND THE SOFTWARE OF THE INTELLECTUAL
SUBSYSTEM OF UAV COLLISION AVOIDANCE**

Бердонос Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: berd1946@gmail.com.

Mr. Victor D. Berdonosov – PhD in Engineering, Professor, Software and Computer Application Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: berd1946@gmail.com.

Журавлёв Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: d.o.zhuravlev@mail.ru.

Mr. Dmitriy O. Zhuravlev – postgraduate student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: d.o.zhuravlev@mail.ru.

Зау Хтет Наинг – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: zawhtetnaing.531991@gmail.com.

Mr. Htet N. Zaw – postgraduate student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: zawhtetnaing.531991@gmail.com.

Аннотация. В работе рассмотрено понятие зоны взаимодействия БПЛА и её границ. Представлены выражения, позволяющие рассчитать границы этой зоны. Предложен интеллектуальный алгоритм ранжирования «угроз» по степени опасности. Показано в виде блок-схемы программное обеспечение, реализующее этот алгоритм и обеспечивающее реализацию скоростного манёвра. Программное обеспечение апробировано прямым моделированием.

Summary. The paper presents the concept of the zone of interaction of the UAV and its boundaries. Expressions are presented that allow to calculate the boundaries of this zone. An intelligent algorithm for ranking threats by degree of danger is proposed. Software is presented in the form of a block diagram that implements this algorithm, as well as provides the implementation of high-speed maneuver. The software has been tested by direct modeling.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), предотвращение столкновения, скоростной подход, система управления, зона взаимодействия, манёвр уклонения, уровень угрозы, моделирование.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), crash prevention, speed approach, control system, interaction zone, evasion maneuver, threat level, simulation.

УДК 004.9

Введение

В настоящее время наблюдается большой интерес к производству и использованию БПЛА. Сферы применения БПЛА постоянно расширяются. Увеличение интенсивности использования БПЛА неизбежно приводит к увеличению их плотности в воздушном пространстве и, следова-

тельно, к увеличению вероятности столкновений со статическими и динамическими объектами. Решением задач предотвращения столкновений занимается большой круг исследователей [6; 7; 10; 11; 12; 13; 14; 15]. Интеллектуальная вычислительная система, предотвращающая столкновения БПЛА, должна решать следующие задачи [10]:

- 1) обнаружение потенциально опасных динамически движущихся объектов;
 - 2) оценка вероятности столкновения по особенностям и характеристикам поведения этих объектов;
 - 3) выбор и реализация алгоритмов уклонения от столкновений.
- Всё разнообразие подходов к решению этих задач можно сконцентрировать в виде морфологической табл. 1.

Таблица 1

Морфотаблица оценки траекторий и реализации манёвров

Элементы	Вариант 01	Вариант 02	Вариант 03	Вариант 04	Вариант 05	Вариант 06	Вариант 07
Размерность пространства траекторий	Двухмерное (2D)	Двухмерное плюс Z (2D+Z)	Трёхмерное 3D	–	–	–	–
Траектории «своего»	Прямая	Дуга	Кусочно-ломаная	Кусочно-дуговая	Кусочно-прямо-дуговая	–	–
Траектории «чужих» БПЛА	Прямая	Дуга	Кусочно-ломаная	Кусочно-дуговая	Кусочно-прямо-дуговая	–	–
Манёвры	В плоскости	Скоростной	Высотный	В плоскости и скоростной	Высотно-скоростной	В плоскости и высотный	–
Учёт траекторий «чужих»	Только ближайшего	N ближайших	N ближайших (с вариацией N)	S в R – радиусе от «своего»	M наилучших по расстоянию	K наилучших по скорости	L наилучших по расстоянию и скорости
Реакция «чужого» на «своего» (манёвры)	Отсутствует	Манёвр в плоскости	Скоростной манёвр	Высотный манёвр	Скоростной и в плоскости	Высотно-скоростной	Высотный и в плоскости
Учёт ограничений «своего» по манёвренности	Без ограничений	По R_{\min} в плоскости	По ускорению в плоскости	По скороподъёмности	По ускорению в 3D-пространстве	По манёвру в 3D-пространстве	–
Учёт ограничений «чужого» по манёвренности	Не маневрирует	По R_{\min} в плоскости	По ускорению в плоскости	По скороподъёмности	По ускорению в 3D-пространстве	По манёвру в 3D-пространстве	–

Наиболее широко [6] используется 2D+Z пространство траекторий как наиболее экономичное с точки зрения вычислительных затрат, по тем же причинам используется линейная аппроксимация [1] для траекторий «своего» и «чужих», что связано с достаточно частым получением информации о движении «своего» и «чужого». Эффективность манёвров в первую очередь определяется ресурсами (в основном энергетическими), необходимыми для их реализации. Манёвры, по мере ухудшения эффективности, можно расположить в следующей последовательности: в плоско-

сти [6; 7; 13], скоростной [7; 13], в плоскости и скоростной [7], высотный [13], в плоскости и высотный, высотно-скоростной. В настоящее время исследователи только в редких случаях учитывают реакцию «угрозы» на перемещение «своего», но появляются работы, в которых прямо или косвенно производится такой учёт [10; 14]. Особый интерес вызывает учёт ограниченных ресурсов БПЛА [6] по манёвренности, скорости, ускорению, скороподъёмности и т. д. Эти ограничения напрямую выводят на границы зоны пространства, ближе которых манёвром не удастся избежать столкновения.

Постановка задачи предотвращения столкновений большого количества БПЛА

Задача предотвращения столкновений двух БПЛА решена [6], однако масштабирование этих решений на большое количество (несколько десятков) взаимодействующих БПЛА не представляется возможным по ряду причин. Во-первых, система предотвращения столкновений должна ранжировать «чужих», так как крайне неэффективно реагировать на всех «чужих» одновременно. Во-вторых, использование в качестве систем обнаружения «чужих» корпоративных систем (АЗН-В и им подобные) [11] сразу в несколько раз увеличивает количество «угроз», которые следует учитывать. В-третьих, некорпоративные системы обнаружения «чужих» (радары, лидары, видеокамера и т. д.) не позволяют осуществлять эффективное обнаружение в городских условиях с большим количеством высотных зданий. В-четвёртых, обработка всего количества обнаруженных «чужих» по полным алгоритмам неизбежно приводит к перегрузке бортовых вычислителей, что особенно актуально для мини- и микроБПЛА, наиболее широко используемых в городах.

В соответствии с морфологической таблицей определим область решаемой задачи: размерность пространства траекторий – двумерное плюс высота ($2D+Z$); траектории движения «своего» и «чужого» – линейные; основной манёвр – скоростной; учёт траектории «чужого» – N ближайших (с вариацией $N < 50$); реакция «чужого» на «своего» отсутствует; учёт ограничений «своего» – ограничения по ускорению в плоскости.

Итак, в соответствии с принятой областью решаемой задачи необходимо разработать алгоритм и программное обеспечение, реализующее этот алгоритм. Алгоритм должен минимизировать вычислительные затраты предотвращения столкновений при значительном количестве потенциальных «угроз».

Решение задачи предотвращения столкновений большого количества БПЛА

Решение данной задачи состоит из двух этапов:

- селекция малоопасных потенциальных «угроз» («чужих»), для которых может быть применён упрощённый алгоритм;
- ранжирование опасных «угроз» («чужих») с выявлением наиболее опасной, для которой должен быть реализован манёвр предотвращения столкновения.

Этап 1. Определение критерия классификации «угроз» («чужих») как малоопасных

Наиболее простым критерием будет являться расстояние от «своего» до потенциальной «угрозы». Соответственно можно выделить такое место точек, которое назовём зоной взаимодействия; «угрозы» будем считать малоопасными.

Большинство исследований, связанных с предотвращением столкновений, не затрагивают вопросы зон взаимодействия. Среди авторов, затрагивающих эти вопросы, большинство определяют зону взаимодействия как некоторую сферу вокруг летательного аппарата, проникновение в границы которой другого аппарата означает их столкновение [14]. В скоростном подходе [2; 3; 5] такое понятие аналогично понятию радиуса безопасности, в котором заранее определены габариты летательного аппарата и минимальное необходимое безопасное пространство.

Авторы Бин Фанг и Тэфанг Чен определяют зоны взаимодействия как участок пространства между аппаратом и границей безопасного круга [10]. Участок пространства похож на радиус летательного аппарата в скоростном подходе, только значение этого радиуса несколько больше. При обнаружении «угрозы» сравниваются дистанции между обоими аппаратами с радиусом безопасного круга, а также сравниваются расстояние до траектории угрозы и радиус безопасного круга. В зависимости от сравнения расставляются уровни угрозы, выбирается манёвр уклонения. Авторами представлена программа моделирования для двух аппаратов.

Скоростной подход, предложенный в работах [2; 3; 5], позволяет оценивать вероятность столкновения и рассчитывать необходимое ускорение или замедление для успешного предотвращения столкновения. Результативность этого подхода была продемонстрирована в специально разработанной программе моделирования для двух БПЛА [8; 9]. С увеличением количества «чужих» потребовались введение механизма определения уровня угрозы столкновения, выявление наиболее опасного БПЛА (с наибольшим уровнем угрозы) и выбор необходимого манёвра уклонения [4].

Для решения этой задачи было введено понятие зоны взаимодействия. Зона взаимодействия – зона вокруг БПЛА, находящаяся между ближней и дальней границами. Ближней границей ($R_{ne}(\beta)$) считается такое минимальное расстояние в зависимости от угла между траекторией «своего» и положением угрозы (β), на котором аппарат сможет совершить скоростной манёвр уклонения. Дальняя граница ($R_{fu}(\beta)$) – это максимальное расстояние, на котором начинает появляться необходимость применения скоростного манёвра.

Прямое математическое моделирование по методу Монте-Карло показало, что зона взаимодействия имеет каплеобразную форму с острой частью, совпадающей с курсом движения «своего»; по курсу движения и сзади наблюдаются мёртвые зоны (см. рис. 1).

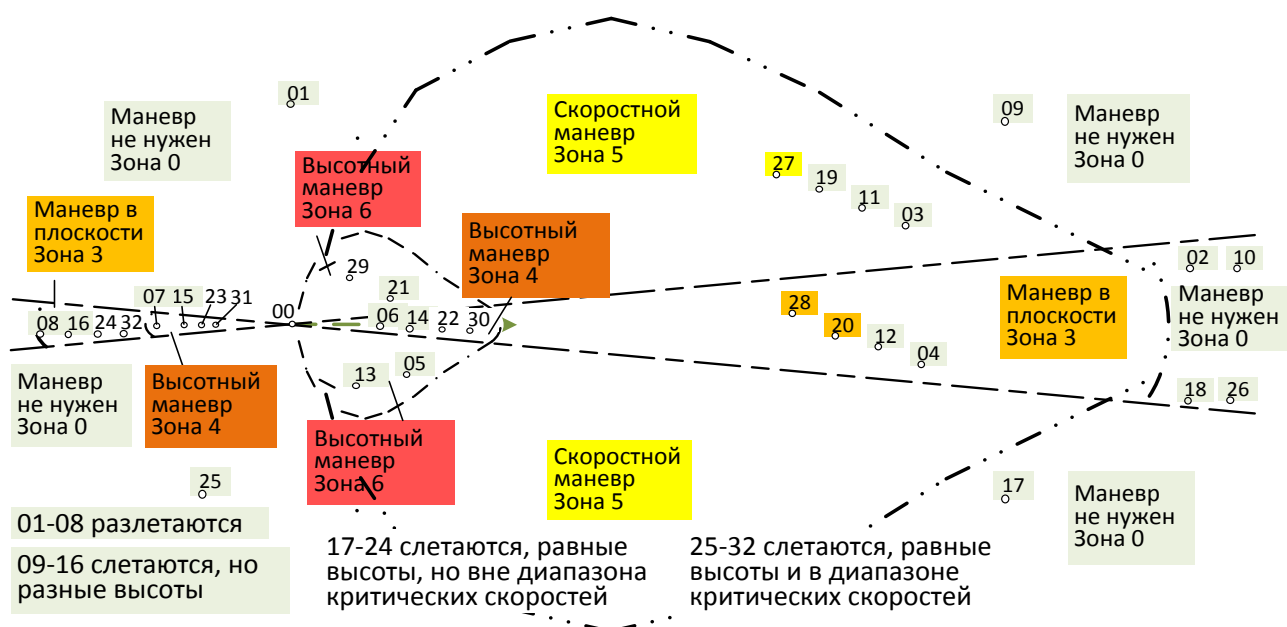


Рис. 1. Распределение зон в воздушном пространстве «своего» и распределение «чужих» на имитаторе воздушного пространства. Цифрами указаны «чужие»; «свой» движется слева направо

Мёртвые зоны – зоны, в которых отсутствует возможность расчёта параметров скоростного манёвра, вызванная особенностью вычислений. Границы зоны взаимодействия зависят от многих параметров, таких как скорость движения «своего», скорость «угрозы», радиусы аппаратов, расстояния обоих аппаратов до точки столкновения, максимально возможное ускорение (замедление), угол схождения траекторий обоих аппаратов, угол между траекторией «своего» и отрезком между центрами обоих аппаратов. Аппроксимирующая функция для ближней границы выглядит следующим образом:

$$R_{ne}(\beta) = u_0 + u_1 \cdot (u_2 - \beta) + u_3 \cdot (u_4 - \beta)^2 + u_5 \cdot (u_6 - \beta)^6,$$

где β – угол между траекторией «своего» и положением «угрозы»; u_i – коэффициенты аппроксимирующей функции: $u_0 = -1,065 \cdot 10^7$; $u_1 = -299,2518$; $u_2 = -3,2956 \cdot 10^4$; $u_3 = 0,0302$; $u_4 = 5,1072 \cdot 10^3$; $u_5 = 1,1873 \cdot 10^{-9}$; $u_6 = 96,2385$.



Полученные выражения для границ зоны взаимодействия позволяют перейти к следующей задаче – ранжирование угроз.

Этап 2. Ранжирование угроз в зоне взаимодействия

Для ранжирования угроз необходимо ввести их классификацию, которую удобнее всего отобразить на полигоне, имитаторе воздушного пространства (см. рис. 1).

В результате распределения зон по уровням получаем: 0 – угрозы нет (по крайней мере, в текущий момент времени); 3 – «чужой» в мёртвой зоне между дальней и ближней границами; 4 – «чужой» в мёртвой зоне внутри ближней границы; 5 – «чужой» в зоне взаимодействия, и скорость «своего» находится в опасном диапазоне; 6 – «чужой» внутри ближней границы зоны взаимодействия, и скорость «своего» находится в опасном диапазоне.

В табл. 2 представлено описание характеристик всех возможных вариантов «угроз» («чужих»).

Таблица 2

Распределение номеров «угроз» по характеристикам

Положение «угроз» относительно зоны взаимодействия	Разлетаются	Слетаются, на другой высоте	Слетаются, на той же высоте, скорость вне критического диапазона	Слетаются, на той же высоте, скорость в критическом диапазоне
За внешней границей зоны взаимодействия	01	09	17	25
За внешней встречной границей мёртвой зоны	02	10	18	26
В зоне взаимодействия	03	11	19	27
Во встречной мёртвой зоне	04	12	20	28
Внутри ближней границы зоны взаимодействия	05	13	21	29
Внутри ближней границы встречной мёртвой зоны	06	14	22	30
Внутри ближней границы попутной мёртвой зоны	07	15	23	31
Внутри попутной мёртвой зоны	08	16	24	32

Текстовое описание алгоритма ранжирования «угроз» выглядит следующим образом:

0. Всем «чужим» БПЛА установить уровень угрозы, равный 0.

1. Определить движение БПЛА относительно точки пересечения траекторий: а) оба БПЛА движутся к точке пересечения траекторий, уровень угрозы установить равным 1; б) только один БПЛА движется в точку пересечения траекторий или ни одного БПЛА (БПЛА разлетаются), уровень угрозы не менять.

2. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен больше 0, сравнить высоты, на которых движутся аппараты: если БПЛА движутся на одинаковой высоте, то рассчитать относительные расстояния обоих БПЛА от точки столкновения и уровень угрозы установить равным 1, иначе – уровень угрозы установить равным 0.

3. Для всех «чужих», уровень угрозы которых больше 0, сравнить углы схождения с углами мёртвых зон для скоростного манёвра: если «чужой» находится во встречной или попутной мёртвой зоне, то уровень угрозы установить равным 2, иначе – уровень угрозы не менять.

4. Для всех «чужих», уровень угрозы которых больше 1, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с дальней границей мёртвой зоны: если за границей, то уровень угрозы установить равным 0, иначе – уровень угрозы установить равным 3.

5. Для всех «чужих», уровень угрозы которых больше 2, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с ближней границей мёртвой зоны: если внутри границы, то уровень угрозы установить равным 4, иначе – уровень угрозы не менять.

6. Для всех «чужих», уровень «угрозы» которых равен 1, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с дальней границей «угрозы» взаимодействия: если за границей, то уровень «угрозы» установить равным 0, иначе – уровень «угрозы» установить равным 5.

7. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен 5, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с ближней границей зоны взаимодействия: если внутри границы, то уровень угрозы установить равным 6, иначе – уровень угрозы не менять.

8. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен 5, по относительным расстояниям, значениям скоростей и координатам точки столкновения определяются критические скорости, и если скорость «своего» лежит в границах опасного диапазона, то уровень угрозы установить равным 7, иначе – установить равным 0.

9. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен 6, по относительным расстояниям, значениям скоростей и координатам точки столкновения определить критические скорости, и если скорость «своего» лежит в границах опасного диапазона, то уровень угрозы установить равным 8, иначе – установить равным 0.

10. Для всех «чужих» с уровнями угрозы, равными 3, 4, 7, 8, рассчитать время до столкновения и определить «чужой», имеющий минимальное время; к уровню этого «чужого» добавить 10.

11. Если хотя бы у одного «чужого» уровень угрозы больше 10, то отдать команду на инициирование скоростного манёвра.

Динамика уровней угроз для представленных в табл. 2 «чужих» в соответствии с алгоритмом приведена в табл. 3.

Таблица 3

Динамика уровня угроз

Пункты алгоритма	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер «чужого»	Запуск	Расчёт точек пересечения	Проверка на совпадение высот	Проверка нахождения в мёртвых зонах	Проверка нахождения за дальней границей мёртвой зоны	Проверка нахождения внутри ближней границы мёртвой зоны	Проверка нахождения за дальней границей зоны взаимодействия	Проверка нахождения внутри ближней границы зоны взаимодействия	Проверка по критическим скоростям в зоне взаимодействия	Проверка по критическим скоростям внутри ближней границы
01-08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09-16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
18	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0
19	0	1	1	1	1	1	5	5	0	0
20	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3
21	0	1	1	1	1	1	5	6	6	0
22	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
23	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
24	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3
25	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
26	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 3

Пункты алгоритма	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер «чужого»	Запуск	Расчёт точек пересечения	Проверка на совпадение высот	Проверка нахождения в мёртвых зонах	Проверка нахождения за дальней границей мёртвой зоны	Проверка нахождения внутри ближней границы мёртвой зоны	Проверка нахождения за дальней границей зоны взаимодействия	Проверка нахождения внутри ближней границы зоны взаимодействия	Проверка по критическим скоростям в зоне взаимодействия	Проверка по критическим скоростям внутри ближней границы
27	0	1	1	1	1	1	5	5	7	7
28	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3
29	0	1	1	1	1	1	5	6	6	8
30	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
31	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
32	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3

Для проверки эффективности алгоритма была разработана программа моделирования. Реализация выполнена на языке программирования C#. Программа позволяет моделировать поведение от 2 до 50 летательных аппаратов и реализовывать описанный алгоритм поведения «своего». Блок-схема программы представлена на рис. 2 и состоит из девяти модулей.



Рис. 2. Блок-схема программы моделирования

Первый БПЛА определяется как «свой», в процессе моделирования производится расчёт вероятности столкновения с остальными БПЛА, которые позиционируются как «угрозы». С учётом зоны взаимодействия опасным БПЛА присваиваются уровни угроз, в соответствии с которыми определяется необходимый манёвр уклонения. Такие расчёты повторяются при каждой итерации моделирования.

Моделирование и его результаты

Моделирование для «своего» и 11 «чужих» БПЛА. Параметры «своего» при моделировании: радиус – 10, начальная скорость – 30, ускорение – 0. Параметры «чужих» при моделировании: радиус – 10, начальная скорость – 39,999, ускорение – 0. БПЛА-угрозы были разделены на пять групп: «угрозы» за дальней границей и в диапазоне критических скоростей (БПЛА с номерами 1 и 2), «угрозы» за дальней границей и вне диапазона критических скоростей (БПЛА 3 и 4), «угрозы» в зоне взаимодействия и в диапазоне критических скоростей (БПЛА 5, 6 и 7), «угрозы» в зоне взаимодействия и вне диапазона критических скоростей (БПЛА 8), «угрозы» на дальней границе (БПЛА 9, 10 и 11).

Результаты моделирования без использования манёвра (см. рис. 3) и с применением скоростного манёвра представлены ниже (см. рис. 4). «Свой» БПЛА отмечен номером 0. На рисунках показаны начало и конец моделирования, а также графики изменения расстояний между «своим» и «чужими» аппаратами с течением времени. Красная пунктирная линия показывает расстояние, равное сумме радиусов «своего» и одного из «чужих» аппаратов. Если расстояние между двумя аппаратами станет меньше либо равным сумме их радиусов, то происходит столкновение. Так как в эксперименте у всех аппаратов одинаковые радиусы (равны 10), то эта граница равна 20 и одинакова для всех «чужих».

На рис. 3, б видно, что 7 аппаратов пересекают красную пунктирную линию. Столкновение происходит с БПЛА под номерами 1, 5, 6, 7, 9, 10, 11. На рис. 3, в с результатом моделирования также можно видеть столкновения, показанные красными крестиками. Так как столкновения с аппаратами 5, 6, 10 и 11 происходят практически в одинаковых местах, на графике они были отмечены одним крестиком.

Результат моделирования той же ситуации, что и на рис. 3, но с применением скоростного манёвра уклонения показывает, что «свой» прошёл по траектории мимо других одиннадцати аппаратов без столкновений.

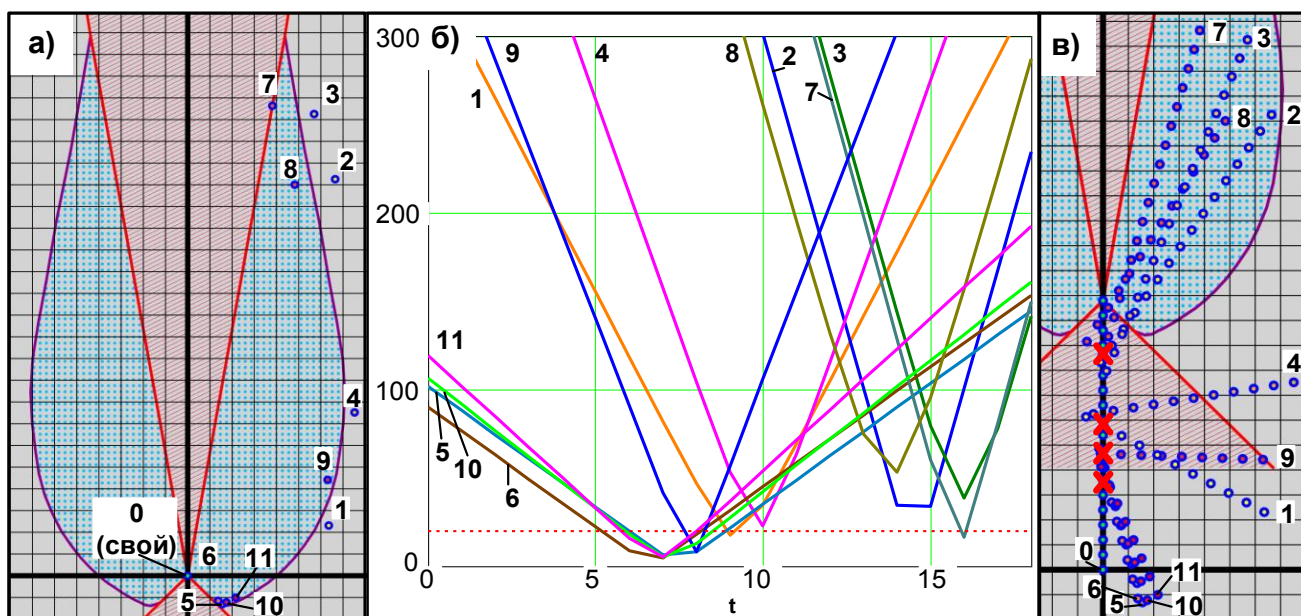


Рис. 3. Результаты моделирования без использования манёвра: а – исходное положение всех аппаратов (красным выделены мёртвые зоны, синим выделена зона взаимодействия); б – графики изменения расстояния между «своим» и каждым БПЛА-угрозой; в – завершение моделирования (места столкновений отмечены красными крестиками)

Рисунок 4, б подтверждает отсутствие столкновений: ни одно расстояние между «своим» и остальными БПЛА не стало меньше суммы их радиусов.

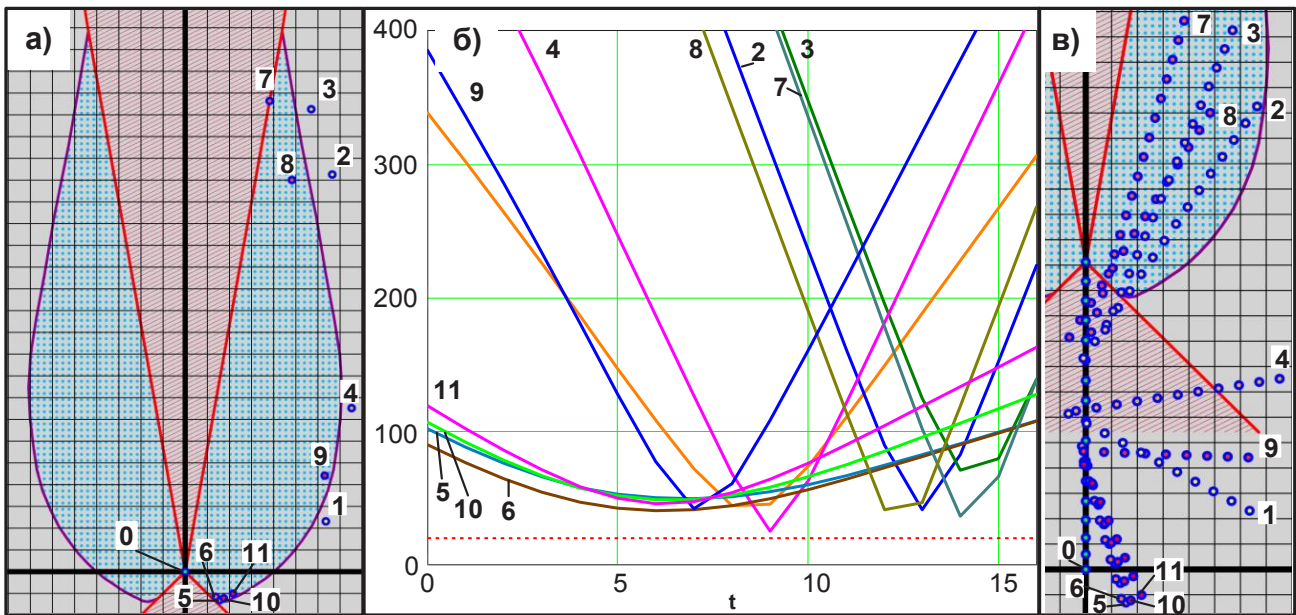


Рис. 4. Результаты моделирования с использованием манёвра: а – исходное положение всех аппаратов (красным выделены мёртвые зоны, синим выделена зона взаимодействия); б – графики изменения расстояния между «своим» и каждым БПЛА-угрозой; в – завершение моделирования, «свой» прошёл весь путь без столкновений

Это доказывает эффективность применения скоростного подхода для предотвращения столкновений большого числа беспилотных летательных аппаратов между собой.

Заключение

В ситуациях, когда несколько беспилотных летательных аппаратов находится в одном воздушном пространстве и несёт угрозу столкновения друг с другом, необходим механизм распределения уровней угрозы для дальнейших определений манёвров выполнения. Таким механизмом может выступать зона взаимодействия, рассчитанная в зависимости от скорости движения «своего» аппарата; относительной скорости «чужого» аппарата; радиусов аппаратов; расстояния обоих аппаратов до точки столкновения; максимально возможного ускорения (замедления) «своего»; угла схождения траекторий обоих аппаратов; угла между траекторией «своего» и прямой между центрами обоих аппаратов. Эффективность такого способа показана успешным моделированием ситуации с одиннадцатью аппаратами-угрозами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метод планирования траектории движения точки в пространстве с препятствием на основе итеративной кусочно-линейной аппроксимации [Электронный ресурс] / В. О. Антонов, М. М. Гурчинский, В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева // Системы управления, связи и безопасности, 2018. – Режим доступа: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/09-Antonov.pdf> (дата обращения: 22.08.2019).
2. Бердоносков, В. Д. К расчёту критических скоростей, ведущих к коллизии двух БПЛА / В. Д. Бердоносков, Х. Н. Зау, Д. О. Журавлёв // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 2017. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 29-30 сентября 2017. – С. 9–14.
3. К расчёту точек столкновения двух БПЛА / В. Д. Бердоносков, Д. О. Журавлёв, Т. Г. Барышева, С. Д. Крылова // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сентября 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. – С. 22–26.

4. Бердонос В. Д. К реализации алгоритма предотвращения столкновений массива БПЛА гражданского назначения / В. Д. Бердонос, Д. О. Журавлёв, М. Д. Ливень // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 05-06 сентября 2018 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 33-37.
5. Бердонос В. Д. Об алгоритме оценивания возможности коллизии двух БПЛА / В. Д. Бердонос, Д. О. Журавлёв, Х. Н. Зау // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сентября 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 15–21.
6. Obstacle Detection and Avoidance System Based on Monocular Camera and Size Expansion Algorithm for UAVs / Abdulla Al-Kaff, Fernando García, David Martín [etc] // Sensors 2017. – 2017. – № 17(5).
7. Collision Prediction based Genetic Network Programming-Reinforcement Learning for Mobile Robot Navigation in Unknown Dynamic Environments / Ahmed H. M. Findi, Mohammad H. Marhaban, Raja, Kamiland Mohd Khair Hassan // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2017. – Volume 12(2). – P. 890–903.
8. Speed Approach for UAV Collision Avoidance / V. D. Berdonosov, A. A. Zhivotova, H. N. Zaw, D. O. Zhuravlev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 22 May. – Vol. 1015. – P. 2–7.
9. Implementation of the Speed Approach for UAV Collision Avoidance in Dynamic Environment / V. Berdonosov, A. Zivotova, D. Zhuravlev, H. N. Zaw // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2019. – January. – P. 1–6.
10. Bin Fang. Research on UAV Collision Avoidance Strategy Considering Threat Levels / Bin Fang, Tefang Chen // Practical Applications of Intelligent Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2014. – Berlin, Germany, 2014. – P. 887–897.
11. Chin, E. Lin. Quasi-ADS-B Based UAV Conflict Detection and Resolution to Manned Aircraft / Chin E. Lin, Ya-Hsien Lai // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2015. – Vol. 2015(3). – P. 1–12.
12. An Efficient Method for Multi-UAV Conflict Detection and Resolution Under Uncertainties / David Alejo, José Antonio Cobano, G. Heredia, A. Ollero // Advances in Intelligent Systems and Computing, Robot-2015: Second Iberian Robotics Conference. – 2015. – P. 635–647.
13. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on interfered fluid dynamical system / Wang Honglun, Lyu Wentao, Yao Peng, Liang Xiao, Liu Chang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2015. – Vol. 28(1). – P. 229–239.
14. Xiao Ou Song. Dynamic MAC Protocol Designed for UAV Collision Avoidance System / Xiao Ou Song // Advances in Intelligent Systems and Computing: materials of Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2017), 10-13 July 2017. – Turin, Italy, 2017. – P. 489–498.
15. Yazdi Ibrahim Jenie. Cooperative Autonomous Collision Avoidance System for Unmanned Aerial Vehicle / Yazdi Ibrahim Jenie, Erik-Jan van Kampen, Bart Remes // In materials: 2nd CEAS Specialist Conference on Guidance, Navigation & Control, Delft, Netherlands. – 10-12 April. – 2013.