

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

В. В. Шерстнев

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является обеспечение безопасности полета беспилотных воздушных судов в составе гетерогенной группы в зоне чрезвычайной ситуации, предназначенных для локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Предметом исследования являются предлагаемые зоны, или сферы безопасности, которые строятся в базовой системе координат, начало которой привязано к определенной точке зоны чрезвычайных ситуаций, вокруг каждого беспилотного воздушного судна или потенциально опасного объекта. Целью работы является разработка концепции применения (и рекомендаций по применению), в том числе построения вокруг каждого беспилотного воздушного судна и потенциально опасных объектов зон, или сфер безопасности, учета взаиморасположения данных зон, или сфер безопасности, пересечение которых в процессе полета беспилотного воздушного судна недопустимо, за счет чего достигается обеспечение защиты того или иного беспилотного воздушного судна от столкновения с препятствиями. *Материалы и методы.* Для описания процесса перехода от локальных систем координат, привязанных к конкретному беспилотному воздушному судну, в базовой системе координат используются матрицы однородного преобразования. Введено понятие сфер безопасности, а также адаптивных сфер безопасности, динамических радиусов адаптивных сфер безопасности. *Результаты.* Предложен подход к обеспечению защиты беспилотных воздушных судов, движущихся в составе гетерогенной группы в зоне чрезвычайной ситуации, от столкновений с препятствиями, в том числе друг с другом. Данный подход может использоваться при организации движения и взаимодействия объектов, действующих в составе многоагентных систем. *Выводы.* Методы, применяемые для перехода от локальных систем координат, привязанных к тому или иному беспилотному воздушному судну (БВС), к базовой системе координат, позволяют организовать движение гетерогенной группы БВС в зоне чрезвычайной ситуации. Разработанные концепция и рекомендации по построению вокруг каждого действующего в составе гетерогенной группы БВС и вокруг потенциально опасных объектов зоны чрезвычайной ситуации, зон или сфер безопасности, а также по учету взаиморасположения данных зон, или сфер безопасности, защищают каждое БВС от столкновения с препятствиями, а также повышают безопасность движения гетерогенной группы БВС в целом.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, гетерогенная группа, сфера безопасности, динамический радиус адаптивной сферы безопасности

Для цитирования: Шерстнев В. В. Обеспечение безопасности полета гетерогенной группы беспилотных воздушных судов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 110–118. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-13

ENSURING THE SAFETY OF A HETEROGENEOUS GROUP OF UNMANNED AIRCRAFT

V.V. Sherstnev

Penza State University, Penza, Russia
iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is to ensure the safety of the flight of unmanned aircraft as part of a heterogeneous group in the emergency zone, designed for the localization and elimination of emergency situations. The subject of the study is the proposed zones, or areas of security, which are built in a basic coordinate system, the beginning of which is tied to a certain point in the emergency zone, around each unmanned aircraft or potentially dangerous object. The purpose of the work is to develop a concept of application (and recommendations for use), including the construction of zones or security areas around each unmanned aircraft and potentially dangerous objects, taking into account the relative position of these zones or security areas, the intersection of which is unacceptable during the flight

of an unmanned aircraft, thereby ensuring the protection of an unmanned aircraft from collision with obstacles. *Materials and methods.* To describe the process of transition from local coordinate systems associated with a specific unmanned aircraft to the base coordinate system, homogeneous transformation matrices are used. The concept of security spheres, as well as adaptive security spheres, dynamic radii of adaptive security spheres is introduced. *Results.* An approach to ensuring the protection of unmanned aircraft moving as part of a heterogeneous group in an emergency zone from collisions with obstacles, including each other, is proposed. This approach can be used to organize the movement and interaction of objects operating as part of multi-agent systems. *Conclusions.* The methods used for the transition from local coordinate systems linked to a particular unmanned aircraft (UAV) to the basic coordinate system allow you to organize the movement of a heterogeneous group of UAVs in the emergency zone. The developed concept and recommendations for the construction of an emergency zone, zones, or security areas around each operating as part of a heterogeneous group of UAVs and around potentially dangerous objects, as well as for taking into account the mutual location of these zones, or security areas, protect each UAV from collisions with obstacles, and also increase the traffic safety of a heterogeneous group of UAVs as a whole.

Keywords: unmanned aircraft, heterogeneous group, security sphere, dynamic radius of adaptive security sphere

For citation: Sherstnev V.V. Ensuring the safety of a heterogeneous group of unmanned aircraft. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3): 110–118. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-13

Идея применения БВС при локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1] является актуальной. Так, в работе [2] предлагается использовать гетерогенную группу БВС, выполняющую задачи по локализации, ликвидации последствий ЧС, в том числе поиску и спасению пострадавших. Использование такой робототехнической системы, представляющей собой рой БВС, ставит актуальным решение следующих задач:

- задача управления движением БВС посредством автопилота;
- задача обхода БВС препятствий в процессе движения, в том числе избегания столкновений с другими БВС.

Задача управления движением конкретного БВС может сводиться к определению его текущего местоположения, а именно: координат в пространстве и ориентации (при этом могут использоваться, например, спутниковые системы навигации, инерциальные системы навигации и т.п.), задания конечной точки движения, выбора оптимального маршрута движения [3].

Затем в процессе движения БВС решается вторая из вышеупомянутых задач – обход препятствий. Большинство современных БВС вертикальных взлета и посадки оснащаются системами избегания столкновений, принцип действия которых основан на применении различных сенсорных устройств – ультразвуковые датчики, лидары, видеокамеры и т.п. Такие системы в отношении статичных препятствий (таких как, например, дерево, стена) справляются успешно: управляющие воздействия передаются силовым установкам заблаговременно и БВС успевает сменить траекторию и скорость своего движения.

Но что касается применения БВС в составе гетерогенной группы в условиях ЧС, то задача избегания столкновений с препятствиями усложняется следующими особенностями. Во-первых, зона ЧС нередко характеризуется наличием препятствий, представляющих повышенную опасность для БВС: это могут быть источники возгорания, фонтанирующие источники утечки жидкостей под большим давлением; приближение БВС на расстояние даже нескольких метров к препятствиям такого рода может являться небезопасным.

Во-вторых, для каждого конкретного БВС в роли препятствий выступают и другие воздушные суда из состава его группы, а также какие-либо иные летательные аппараты, присутствующие в зоне ЧС. В этом случае системы избегания столкновений с препятствиями, которыми изначально оснащается БВС, могут не успеть сработать: летательные аппараты нередко двигаются на достаточно больших скоростях, зигзагообразно меняя траекторию своего движения, что может привести к их столкновению друг с другом. Более того, даже два летательных аппарата, зависших в воздухе, могут оказывать друг на друга воздействие: более массивное БВС воздушными потоками, создаваемыми своими силовыми установками, будет «сдувать» в сторону легкое воздушное судно (что в результате может привести последнего к столкновению с каким-либо препятствием).

В связи с этим предлагается использовать единый пункт координации и управления движением БВС в составе гетерогенной группы в зоне ЧС, который будет выполнять задачи

по отслеживанию местоположения, траектории, скорости движения всех БВС в так называемой «глобальной», или базовой, системе координат, за начало которой может браться как сам пункт координации и управления движением, расположенный, например, в пределах зоны ЧС, так и какая-то опорная точка, выбранная оператором данного пункта.

Для управления процессом движения какого-либо БВС посредством автопилота требуется также использование и двух локальных систем координат, начала которых привязаны к данному судну: локальная неподвижная система координат, посредством использования которой задается направление движения БВС к пункту назначения, а также локальная подвижная система координат, направления осей которой зависят от фактической ориентации БВС в пространстве. На рис. 1 изображен вариант задания базовой системы координат $OX_0Y_0Z_0$, локальной неподвижной системы координат $oxyz$, локальной подвижной системы координат $ox'y'z'$. В процессе движения осуществляется «нацеливание» БВС на определенные точки траектории посредством совмещения локальной подвижной системы координат с неподвижной путем задания необходимых углов крена, тангажа и рыскания (представляющих собой углы Эйлера).

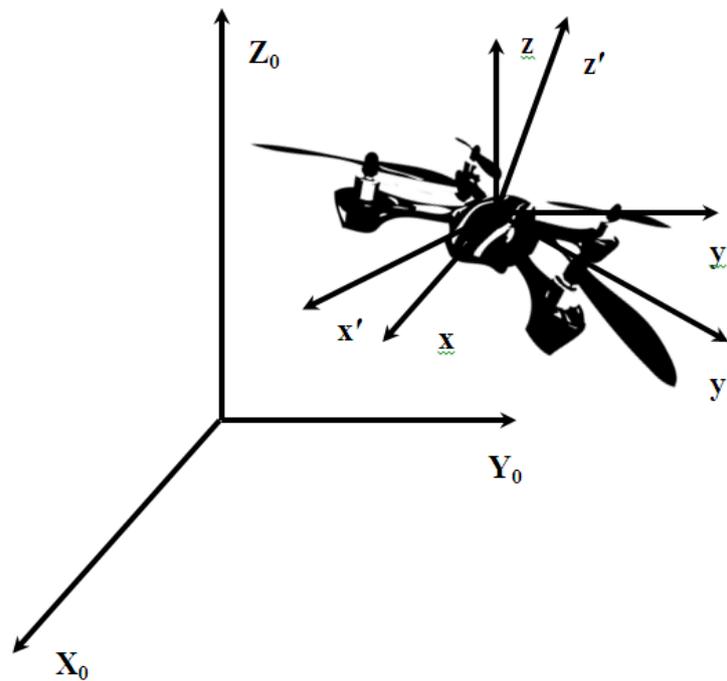


Рис. 1. Вариант задания систем координат

Переход от одной системы координат к другой может описываться через матрицы однородных преобразований [4, 5]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \lambda \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \mu \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \nu \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – величины, характеризующие углы поворота конечной системы координат $Ox'y'z'$ относительно начальной системы координат $OXYZ$, а λ, μ, ν – величины, характеризующие смещение конечной системы координат вдоль осей Ox , Oy , Oz начальной системы координат соответственно.

Также (1) может описываться системой уравнений

$$x' = \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z + \lambda, \quad y' = \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 z + \mu, \quad z' = \gamma_1 x + \gamma_2 y + \gamma_3 z + \nu. \quad (2)$$

Алгоритм движения БВС выглядит следующим образом (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм движения БВС

Шаг 1. Задание пункта назначения оператором.

Шаг 2. Определение координат пункта назначения в базовой системе координат.

Шаг 3. Задание локальных подвижной и неподвижной систем координат в базовой системе координат.

Шаг 4. Построение маршрута движения БВС к пункту назначения.

Шаг 5. Задание ориентации, или нацеливание БВС, т.е. придание необходимой ориентации локальным системам координат, при этом ориентация локальной неподвижной системы координат фиксируется и не изменяется в процессе следования БВС к пункту назначения (ориентация локальной подвижной системы координат перед началом выдвигания БВС к пункту назначения будет совпадать с ориентацией локальной неподвижной системы координат).

Шаг 6. Выдвигание БВС к пункту назначения.

Шаг 7. Постоянное отслеживание параметров движения путем вычисления скорости движения БВС и углов Эйлера, причем последние представляют собой разницу между ориентациями локальными системами координат БВС.

Шаг 8. Корректировка движения БВС в случае необходимости посредством выдачи управляющих воздействий силовым установкам БВС, предназначенных для контроля соответствия направления движения БВС заданной траектории.

Шаг 9. Постоянная передача информации о характеристиках движения автоматизированному рабочему месту оператора БВС.

Шаг 10. Прибытие в пункт назначения.

Шаги 7–9 данного алгоритма циклично повторяются вплоть до прибытия БВС в пункт назначения.

Определение скорости движения БВС может осуществляться как за счет системы спутниковой навигации, так и за счет установленных на БВС датчиков определения скорости (акселерометров). Определение углов Эйлера в процессе движения БВС может осуществляться за счет датчиков-гироскопов, установленных на БВС.

Так или иначе, если препятствия должны обгибаться на относительно большом расстоянии, целесообразным является контроль полета всех БВС единым управляющим центром, задающим безопасные для них зоны, или «сферы безопасности» (рис. 3), каждая из которых представляет собой геометрическое место точек, равноудаленных от центра объекта, вокруг которого она построена. Так, например, сферы безопасности, заданные индивидуально для каждого БВС, не должны друг с другом соприкасаться и тем более пересекаться. Такие же сферы безопасности можно строить и вокруг поражающих источников (ПИ) ЧС в зависимости от их характера: так, например, сфера безопасности какого-либо конкретного БВС не должна соприкасаться и пересекаться со сферой безопасности, построенной вокруг источника огня.

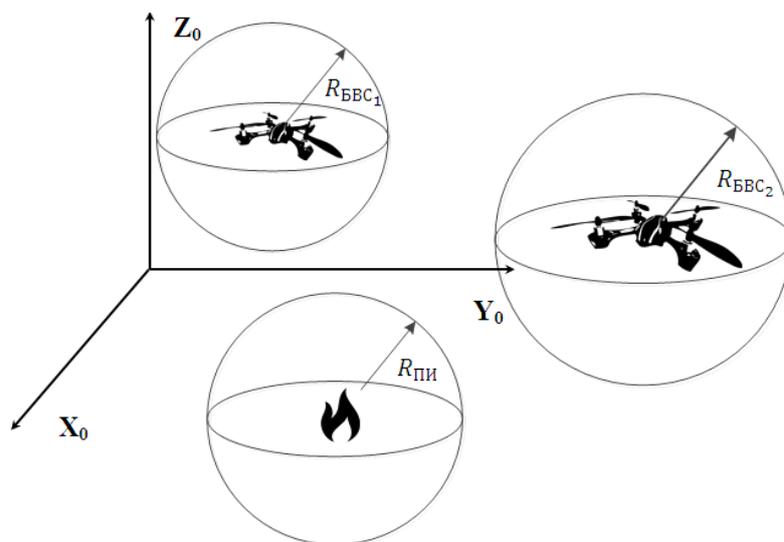


Рис. 3. Построение сфер безопасности

В зависимости от взаимного расположения двух БВС возможно выполнение одного из следующих условий:

1. Сферы безопасности двух БВС пересекаются, требуется их разместить на безопасное расстояние (рис. 4):

$$R_{\phi} < R_1 + R_2, \quad (3)$$

где R_{ϕ} – фактическое расстояние между БВС, определяемое с помощью систем навигации; R_1 – радиус сферы безопасности первого БВС; R_2 – радиус сферы безопасности второго БВС.

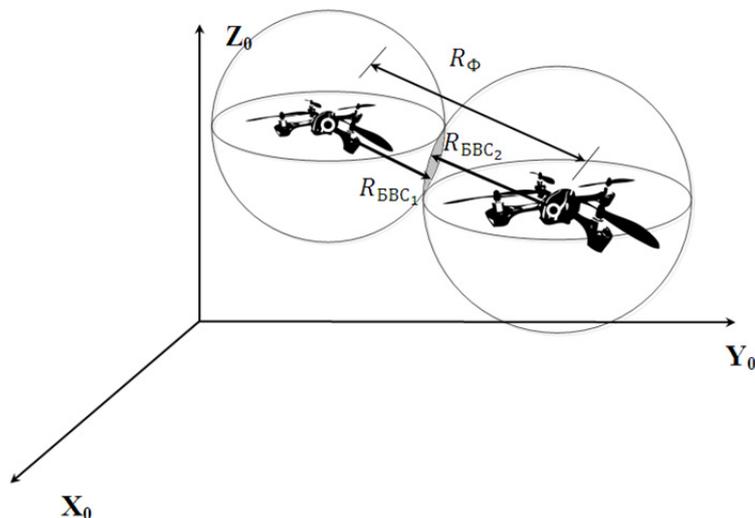


Рис. 4. Частный случай пересечения сфер безопасности

2. Сферы безопасности двух БВС пересекаются, т.е. имеют одну общую точку; аналогично предыдущей ситуации, требуется их размещение на безопасное расстояние (рис. 5):

$$R_{\Phi} = R_1 + R_2. \quad (4)$$

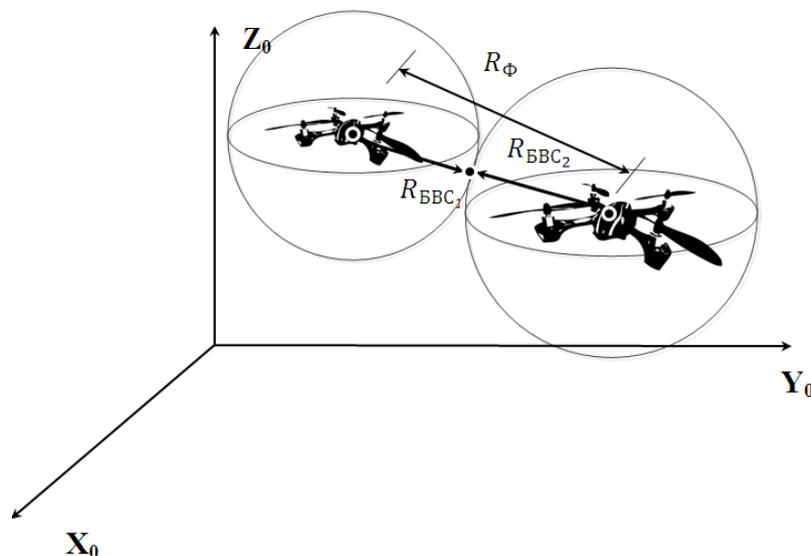


Рис. 5. Частный случай прикосновения сфер безопасности

3. БВС находятся на безопасном расстоянии, их сферы безопасности не пересекаются (рис. 6):

$$R_{\Phi} > R_1 + R_2. \quad (5)$$

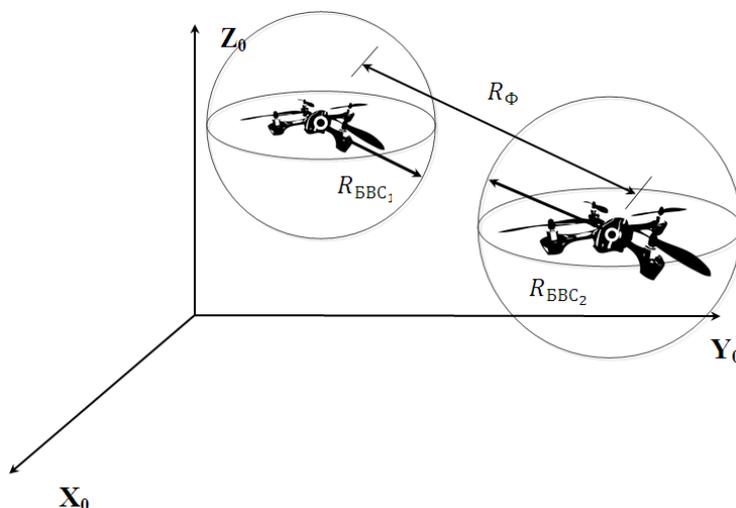


Рис. 6. Частный случай неприкосновения сфер безопасности

Подход к решению данной задачи, заключающийся в обработке информации о всех сферах безопасности единым управляющим центром и навигации им БВС, кроме того, позволяет рассчитывать траекторию движения каждого БВС «априорно», т.е. прокладывать их маршруты, заранее проверяя их на возможные случаи наличия точек касания сфер безопасности.

Кроме того, в целях «экономии» пространства целесообразно использовать адаптивные сферы безопасности с динамическим радиусом, т.е. изменяющимся в зависимости от условий, поскольку это позволит наиболее эффективно использовать рабочее пространство БВС. Так, если БВС неподвижно, то радиус его адаптивной сферы безопасности минимален, он обуславливает лишь его безопасность в случае подлета других БВС; если же БВС, например, дви-

жется к цели в условиях ограниченной видимости (дым), радиус его сферы безопасности должен быть увеличен, причем чем выше скорость его движения, тем больше путь его остановки в случае возникновения необходимости резкой остановки и соответственно, тем больше должен быть его радиус безопасности.

В качестве иллюстрации можно рассмотреть график зависимости величины пути остановки БВС от начальной скорости его движения непосредственно перед началом торможения. Предполагаются идеальные условия, когда движение БВС является равнозамедленным, а его ускорение (со знаком «минус») составляет -30 м/с^2 (рис. 7).

Величина пути
остановки, м

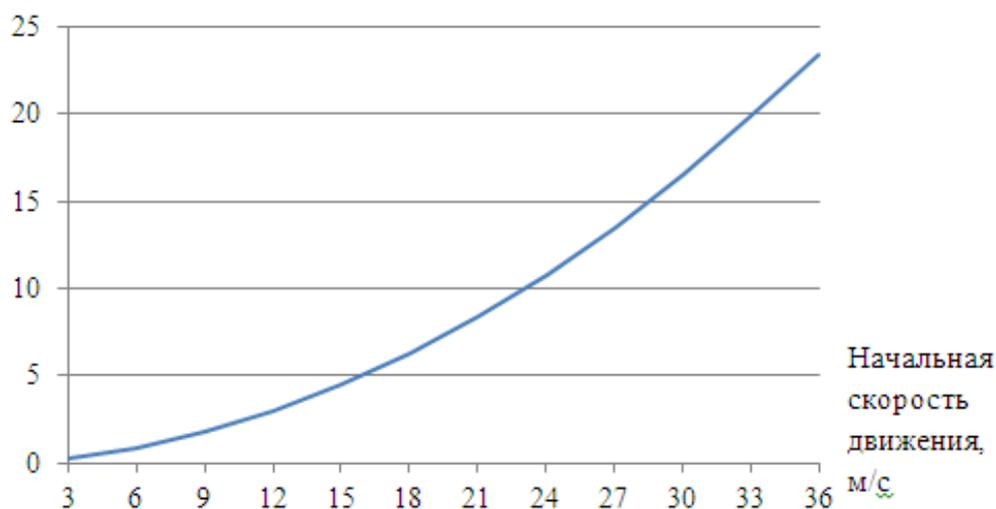


Рис. 7. График зависимости величины пути остановки БВС от начальной скорости его движения (вариант)

Так, согласно данному примеру динамический радиус адаптивной сферы безопасности при скорости движения БВС непосредственно перед началом его торможения, равной 24 м/с, должен превышать 10,8 м.

Предлагается производить расчет динамических радиусов безопасности БВС в зависимости от следующих факторов:

1. Скорость движения БВС: чем быстрее движется БВС, тем больше радиус безопасности (на высокой скорости БВС труднее остановиться). Кроме того, у каждого БВС свои масса (в связи с чем целесообразно градировать БВС, входящие в состав гетерогенной группы [2], по их массе: БВС поискового назначения – сверхлегкий, координирующего – легкий, медицинского и экологического назначения – средние, а БВС эвакуационной назначения – тяжелый), характеристики силовых установок, аэродинамика и т.д.

2. Взаимные размеры двух БВС: тяжелый и легкий БВС должны находиться на большем расстоянии друг от друга, чем, например, два тяжелых (массивные БВС могут «сдвигать» легкие БВС).

3. Характер препятствий, а именно их физико-химические свойства: вокруг таких препятствий, как например столб, не требуется строить отдельный радиус безопасности; вокруг источников открытого пламени или например источника утечки воды под большим давлением, наоборот, требуется.

4. Скорость и направление ветра: данные характеристики могут оказывать существенное влияние на скорость движения БВС.

5. Условия видимости: в условиях, например, большой задымленности, недостаточной освещенности снижается чувствительность сенсоров БВС, отвечающих за обнаружение препятствий (например, камера, ультразвуковой датчик); особенно опасна ситуация внезапного появления препятствий на пути движения БВС.

Таким образом, для учета вышеупомянутых факторов и расчета радиуса безопасности каждого отдельно взятого БВС предлагается использовать формулу

$$R = v \times x \times f \times w \times d \times c \times R_0, \quad (6)$$

где R – вычисляемый адаптивный радиус сферы безопасности; R_0 – радиус сферы безопасности неподвижного БВС; v – коэффициент, зависящий от скорости движения БВС; x – коэффициент, зависящий от расстояния между двумя соседними БВС; f – коэффициент, зависящий от характера препятствия (физико-химических свойств препятствия) рядом с БВС; w – коэффициент, зависящий от скорости ветра; d – коэффициент, зависящий от угла между направлением движения БВС и направлением ветра; c – коэффициент, зависящий от условий видимости.

Расчет вышеупомянутых коэффициентов зависит от характеристик конкретного БВС; порядок расчета является перспективной задачей, планируемой к решению.

Предполагается также возможным увеличивать сферу безопасности не равномерно, а лишь по направлению движения БВС (рис. 8), таким образом, БВС получает вокруг себя «эллипс безопасности».

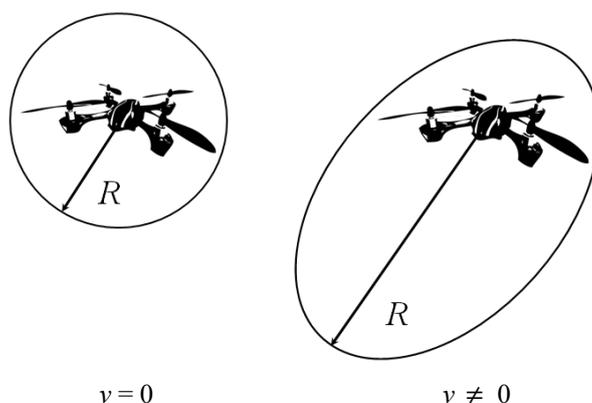


Рис. 8. Увеличение динамического радиуса адаптивной сферы безопасности в зависимости от скорости движения БВС

Безусловно, это усложнит расчеты, но позволит более эффективно использовать пространство вокруг данного воздушного судна.

Предложенный подход позволяет не только повысить защиту от столкновений с препятствиями БВС, движущихся в составе гетерогенной группы в зоне ЧС, но и может использоваться для обеспечения безопасности движения объектов в других подобных мультиагентных системах.

Список литературы

1. Шерстнев В. В., Бодин О. Н. Особенности использования беспилотных воздушных судов при проведении поисково-спасательных работ // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 183–185.
2. Патент 2694528 Российская Федерация. Способ проведения поисково-спасательных работ / Шерстнев В. В., Бодин О. Н., Безбородова О. Е., Рахматуллин Ф. К., Герасимов А. И. ; заявитель и правообладатель ООО «Кардиовид», г. Пенза. № 2018139491 ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.
3. Шерстнев В. В., Безбородова О. Е., Петухов В. И. Выбор траектории полета беспилотных воздушных судов при мониторинге окружающей среды // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шлядинские чтения – 2019» (г. Пенза, 28–30 октября 2019 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 143–146.
4. Матрицы поворота, углы Эйлера и кватернионы (Rotation matrices, Euler angles and quaternions). URL: https://api-2d3d-cad.com/euler_angles_quaternions/ (дата обращения: 28.05.2021).
5. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. Методы управления робототехническими приложениями. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 108 с.

References

1. Sherstnev V.V., Bodin O.N. Features of the use of unmanned aircraft during search and rescue operations. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:183–185. (In Russ.)
2. Patent 2694528 Russian Federation. Method of search and rescue operations. Sherstnev V.V., Bodin O.N., Bezborodova O.E., Rakhmatullof F.K., Gerasimov A.I.; the applicant and the copyright holder of LLC "Cardiovid", Penza. No. 2018139491; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, bull. No. 20. (In Russ.)
3. Sherstnev V.V., Bezborodova O.E., Petukhov V. I. Choosing the flight path of unmanned aircraft during environmental monitoring. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2019» (g. Penza, 28–30 oktyabrya 2019 g.) = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information : materials of the International Scientific and Technical conf. "Shlyandinsky readings - 2019" (Penza, October 28–30, 2019)*. Penza: Izd-vo PGU, 2019:143–146. (In Russ.)
4. *Matritsy povorota, ugly Eylera i kvaterniony = Rotation matrices, Euler angles and quaternions*. (In Russ.). Available at: https://api-2d3d-cad.com/euler_angles_quaternions/ (accessed 28.05.2021).
5. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A. *Metody upravleniya robototekhnicheskimi prilozheniyami = Methods of controlling robotic applications*. Saint-Petersburg: Universitet ITMO, 2016:108. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Владислав Вадимович Шерстнев**

соискатель,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Vladislav V. Sherstnev

Applicant,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**The authors declare no conflicts of interests.****Поступила в редакцию/Received 22.06.2021****Поступила после рецензирования/Revised 29.06.2021****Принята к публикации/Accepted 30.06.2021**