

УДК 629.7.014

Организация функционирования групповых роботизированных систем БПЛА на основе целевых технологических эффектов

А.К. Мещеряков, А.Ю. Потюпкин

Военная академия РВСН имени Петра Великого

Organizing the group robotic UAV systems operation based on the targeted technological effects

A.K. Mescheryakov, A.Y. Potyupkin

Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Forces

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) получают все большее распространение в различных отраслях. В процессе развития технологий появилась возможность объединять БПЛА в группы, что приводит к возникновению новых эффектов функционирования. Традиционно беспилотные аппараты применяют в одиночном исполнении, что накладывает ограничения на их возможности, а также затрудняет координацию операторов между собой. При использовании в группе предполагается, что система будет построена по типу роя и сможет выполнять задачи автономно. Рассмотрено применение БПЛА в группах с целью реализации новых эффектов функционирования, одним из которых является непрерывность наблюдения. Показана структура организации функционирования групповых БПЛА, а также математическая модель, позволяющая оценивать реализацию эффекта непрерывности. Выделены основные параметры БПЛА, которые необходимо контролировать во время полета и которые влияют на реализацию такого целевого эффекта.

EDN: NPZGIU, <https://elibrary/npzgiu>**Ключевые слова:** многоагентные системы, БПЛА, сценарий применения, эффект непрерывности, ситуационное управление

Modern unmanned aerial vehicles (UAV) are becoming increasingly widespread in various areas. In the process of technological development, it becomes possible to combine UAVs into groups, which leads to the new operation effects. Traditionally, unmanned aerial vehicles are employed in a single version restricting their capabilities and complicating coordination between the operators. Employing in a group assumes that the system is built as a swarm and is able to perform the tasks autonomously. The paper considers the UAVs employment in groups to implement new operation effects, one of which is continuity in the observation. It shows structure of the group UAVs operation organization, and presents a mathematical model making it possible to assess implementation of the continuity effect. The UAV main parameters that should be controlled during the flight and affect implementation of such a target effect are highlighted.

EDN: NPZGIU, <https://elibrary/npzgiu>**Keywords:** multi-agent systems, UAV, employment scenario, continuity effect, situational management

В настоящее время активно разрабатываются предложения по групповому применению роботизированных систем в различных сферах: социально-экономической, научной, деятельности силовых структур. При этом основной акцент сделан на развитие беспилотной авиации — беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В частности, в Российской Федерации утверждена соответствующая программа ее развития*.

Специалисты предлагают несколько подходов к организации совместного функционирования групп БПЛА — строй, рой, кластер и т. д. — с целью достижения группового результата. Известна концепция сценариев функционирования, описывающих различные варианты совместных действий групп БПЛА во время решения групповой задачи. При этом считается, что каждый сценарий состоит из отдельных эпизодов [1]. Предполагается, что отдельный БПЛА группы имеет функциональное назначение, в том числе различное, играет свою роль в зависимости от полезной нагрузки и общей задачи.

Анализ операций выполнения ролевых функций в рамках эпизодов сценариев можно подразделить на две группы: целевые и технологические. Целевые операции отвечают за реализацию функционального предназначения БПЛА (мониторинг [2–5], связь [6–8], транспорт), а технологические — за функционирование БПЛА в соответствии с технологическим циклом управления. Технологические операции определяются типом управляемого объекта и концепцией управления.

Цель работы — выявление особенностей новых возможностей группового взаимодействия БПЛА и их описание для разработки математических моделей функционирования.

Управление отдельным БПЛА осуществляется на основе концепции ситуационного управления, когда для покрытия всего спектра задач управления объект управления обладает ограниченным набором средств достижения цели — управляющих воздействий (таких как включение–выключение аппаратуры, ускорение, торможение, поворот, взлет, посадка, изменение высоты и т. д.).

* Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года <http://static.government.ru/media/files/3m4ANa9s3PrYTDr316ibUtyEVUpnRT2x.pdf> [электронный ресурс], (дата обращения 09.11.2023 г.).

Однако в связи с групповым применением интерес представляют операции групп БПЛА, например функциональная операция — непрерывный мониторинг заданного района. Переход на уровень групп диктует необходимость разработки нового вида технологических операций уровня группы БПЛА.

Переход на уровень групп БПЛА в рамках ситуационного подхода позволяет предложить совокупность технологических операций группового уровня в виде так называемых целевых эффектов группы, таких как непрерывность, комплексность обслуживания заданного района, информационный обмен и формирование рабочих структур.

Тогда в общей структуре организации функционирования группы БПЛА, включающей в себя сценарии, эпизоды, индивидуальные операции, появится дополнительное звено целевых технологических эффектов (рис. 1).

Более детальная схема взаимодействия различных звеньев при принятии решений на формирование сценария применения приведена на рис. 2.

Пусть заданы множества:

- функций БПЛА — мониторинг, связь, организация, обеспечение;



Рис. 1. Структурная схема организации функционирования группы БПЛА

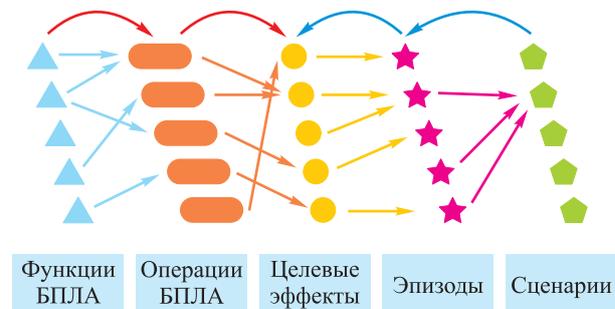


Рис. 2. Схема взаимодействия различных звеньев при принятии решений на формирование сценария применения БПЛА

- *типовых технологических операций* — взлет, посадка, разворот, изменение скорости полета, ее высоты и др.;

- *целевых эффектов* — непрерывности, комплексности, информационного обмена, формирования рабочих структур, индивидуального полета в составе группы;

- *эпизодов* — выход в заданный район, определение рабочей структуры, выполнение целевой задачи, контроль качества, реконфигурация структуры;

- *сценариев* — мониторинг заданного района, доставка грузов, обслуживание выбранных потребителей.

Для выбранных функций БПЛА задан набор полетных операций, на основе которых можно реализовать целевые эффекты группового применения БПЛА. Они в свою очередь являются базисными при реализации эпизодов функционирования для построения сценариев применения групп БПЛА.

Алгоритм реализации сценария применения включает в себя следующие шаги:

- задание сценария применения в зависимости от цели использования группы БПЛА;

- определение составляющих эпизодов заданного сценария;

- отбор целевых эффектов, способных их реализовать на основе выбранных эпизодов; формирование множества необходимых целевых эффектов;

- определение множества функций БПЛА, участвующих в реализации сценария;

- задание множества индивидуальных полетных операций для выбранных функций БПЛА;

- формирование множества возможных целевых эффектов для реализации выбранных функций БПЛА путем выполнения установленного набора полетных операций;

- оценка соответствия множеств необходимых и возможных целевых эффектов;

- модификация функций и операций БПЛА или коррекция выбранного сценария применения в случае несоответствия необходимых и возможных целевых эффектов.

Таким образом, предлагаемое дополнительное звено в виде целевых эффектов является опорным в общей схеме принятия решения.

Целесообразность введения дополнительно звена обусловлена необходимостью автоматизации процессов управления группой БПЛА при решении целевых задач. Последовательная

разработка алгоритмов реализации индивидуальных операций, целевых эффектов, эпизодов и в итоге режимов как совокупности алгоритмов и операций для сценариев функционирования позволит создать необходимое бортовое программное обеспечение для повышения автономности управления БПЛА.

В этом случае вместо указания конкретных операций управления для каждого БПЛА будут задаваться исходные данные для встроженных алгоритмов и режимов соответствующего уровня, что позволит значительно сократить потоки управляющей информации. Подобная схема, активно применяемая при формировании полетных заданий отдельных БПЛА, уже доказала эффективность.

Однако любая автоматизация предполагает наличие математической модели процесса или явления, в том числе описанных индивидуальных операций, целевых эффектов, эпизодов и сценариев. В настоящее время известны модели операций, сценариев и отдельных эпизодов, однако модели целевых эффектов отсутствуют. Наибольший интерес вызывает целевой эффект непрерывности наблюдения, являющийся основой для эффектов многопозиционности и комплексности наблюдения.

Разработка математической модели непрерывности наблюдения и других эффектов позволит создать практически реализуемые алгоритмы функционирования для групп БПЛА, исследовать их свойства и выдать предложения по его реализации в реальных условиях вплоть до создания работоспособного бортового программного обеспечения.

Рассмотрим указанный эффект подробнее. Непрерывность наблюдения является одним из эффектов, который можно достичь при использовании многоагентной роботизированной системы в виде роя БПЛА. Реализация этого эффекта подразумевает, что во время полета группы БПЛА непрерывно ведется наблюдение за определенным участком территории (объектом) с перекрытием зон наблюдения вслед летящими БПЛА. Благодаря данному эффекту появляется возможность оперативного принятия решений в условиях динамического изменения обстановки, а также мониторинга территорий с привлечением минимального количества людских ресурсов (рис. 3).

Важным вопросом является реализация процесса управления группой БПЛА. Современный

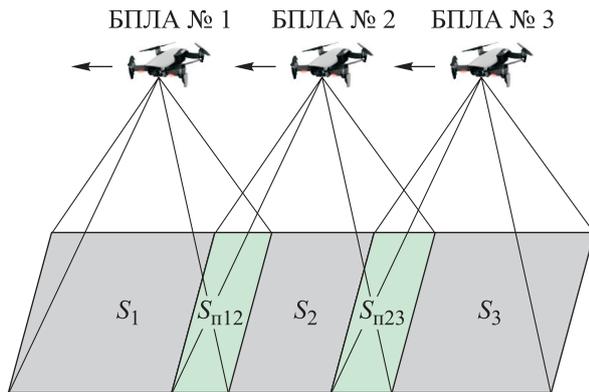


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая эффект непрерывности наблюдения:
 S_1 , S_2 и S_3 — площадь первой, второй и третьей наблюдаемой территории соответственно;
 $S_{п12}$ — площадь пересечения первой и второй зон наблюдения БПЛА; $S_{п23}$ — площадь пересечения второй и третьей зон наблюдения БПЛА

уровень развития систем управления БПЛА предполагает, что каждым из БПЛА автономно управляет оператор. Однако такой вариант является несовершенным, в связи с чем интересно реализовать групповое управление роем БПЛА.

Будем считать, что отдельные БПЛА могут взаимодействовать с целью самоорганизации во время полета в соответствии с поставленной задачей и условиями меняющейся обстановки. Следовательно, отдельные БПЛА роя должны самостоятельно изменять параметры полета с учетом необходимости выполнения эффекта непрерывности [9]. Для реализации такого подхода необходимо разработать математическую модель эффекта непрерывности и определить контролируемые параметры, обеспечивающие требуемый результат взаимодействия. Далее для простоты будем рассматривать группу только из ведущего и ведомого БПЛА.

Учитывая стохастический характер рассматриваемой задачи, связанный с влиянием случайных факторов, в первую очередь метеорологических, в качестве основного показателя эффекта непрерывности введем вероятность непрерывного наблюдения, равную отношению времени полета группы БПЛА, когда данный эффект выполнялся, к общему времени полета.

Предлагаемый алгоритм расчета вероятности непрерывного наблюдения включает в себя следующие основные этапы:

1) вычисление площади наблюдения каждым БПЛА в группе;

2) определение площади перекрытия зон наблюдения;

3) проверка выполнения эффекта непрерывности наблюдения;

4) расчет вероятности непрерывного наблюдения.

На первом этапе вычисляют площадь зоны, которую видит под собой каждый БПЛА. Площадь наблюдения будет зависеть от высоты полета и характеристик оптического средства наблюдения. Площадь наблюдаемой зоны

$$S = l_v l_h.$$

Здесь l_v и l_h — размеры наблюдаемой зоны по вертикали и горизонтали,

$$l_v = 2htg \frac{\alpha_v}{2}; \quad l_h = 2htg \frac{\alpha_h}{2},$$

где h — высота полета; α_v и α_h — углы обзора камеры по вертикали и горизонтали.

Определяют углы обзора камеры:

• по вертикали

$$\alpha_v = 2\text{arctg} \frac{d_v}{2f};$$

• по горизонтали

$$\alpha_h = 2\text{arctg} \frac{d_h}{2f};$$

• по диагонали

$$\alpha_d = 2\text{arctg} \frac{d_d}{2f},$$

где d_v — размер матрицы по вертикали (меньшая сторона матрицы), мм; d_h — размер матрицы по горизонтали (большая сторона матрицы), мм; d_d — размер матрицы по диагонали; f — фокусное расстояние камеры, мм.

На втором этапе происходит привязка координат к углам зоны наблюдения и дальнейшее вычисление площади пересечения. Так как зоны пересечения могут представлять собой геометрические фигуры разных форм и размеров, вычисление площади выполняют методом Монте-Карло, что приводит к незначительному снижению точности вычислений. Второй этап включает в себя четыре последовательных шага.

Шаг 1. Для упрощения вычислений координаты из географических переводим в метры, отсчитываемые от нулевого меридиана и нулевой параллели. Вводят условие, что ось OX

направлена на восток, а ось OY — на север. Перевод осуществляют по выражениям [10]

$$L_{lat} = \frac{l_m}{360}; \quad L_{lon} = \frac{2\pi R_E \cos LAT}{360},$$

где L_{lat} и L_{lon} — метров в одном градусе широты и долготы соответственно; l_m — длина меридиана; R_E — радиус Земли (экваториальный); LAT — широта (от англ. latitude).

Положения X и Y находят как

$$X = L_{lat}LAT; \quad Y = L_{lon}LON, \text{ м,}$$

где LON — долгота (от англ. longitude).

Шаг 2. Вычисляют координаты углов зон наблюдения БПЛА x_n и y_n , где n — порядковый номер угла прямоугольника зоны наблюдения. Нумерация — по ходу часовой стрелке с верхнего правого угла по оси OY БПЛА (ось OY соответствует направлению полета БПЛА):

$$x_n = X + \frac{l_d}{2} \cos \alpha;$$

$$y_n = Y + \frac{l_d}{2} \cos \alpha;$$

$$\alpha = \alpha_{azimuth} + \arctg \frac{l_v}{l_h},$$

где l_d — размер наблюдаемой зоны по диагонали; α — угол смещения прямоугольника зоны наблюдения относительно севера; $\alpha_{azimuth}$ — угол поворота оси OY БПЛА относительно севера.

Шаг 3. Для вычисления площади перекрытия зон полета БПЛА необходимо найти координаты точек пересечения этих зон.

При расчете координат пересечения зон наблюдения проверяют наличие точек пересечения между всеми отрезками зон наблюдения. Координаты n -го отрезка первой зоны наблюдения x_{1n} , y_{1n} , x_{2n} , y_{2n} и координаты n -го отрезка второй зоны наблюдения x_{3n} , y_{3n} , x_{4n} , y_{4n} .

Координаты пересечения двух прямых

$$x_{cr} = x_1 U_a + x_2 (1 - U_a);$$

$$y_{cr} = y_1 U_a + y_2 (1 - U_a),$$

где U_a — параметры первого отрезка,

$$U_a = \frac{(x_4 - x_2)(y_4 - y_3) - (x_4 - x_3)(y_4 - y_2)}{(y_4 - y_3)(x_1 - x_2) - (x_4 - x_3)(y_1 - y_2)}.$$

Шаг 4. Зная координаты точек пересечения и координаты зон наблюдения, рассчитывают площадь пересечения зон наблюдения методом Монте-Карло

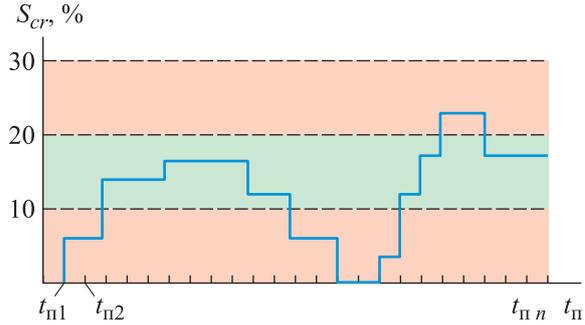


Рис. 4. Пример выполнения эффекта непрерывности наблюдения

$$S_{cr} = \frac{j}{N} S_1,$$

где j — количество точек, попавших в область зоны пересечения; N — общее количество точек.

На третьем этапе проверяют, удовлетворяет ли полученное значение площади пересечения зон наблюдения S_{cr} требуемому, т. е. в моменты отсчета времени полета площадь пересечения должна быть в допустимом интервале (рис. 4)

$$S_{\text{тр min}} \leq S_{cr} \leq S_{\text{тр max}},$$

где S_{min} и S_{max} — минимальное и максимальное значения требуемой площади пересечения зон наблюдения.

Если значение удовлетворяет, то фиксируют данный факт и время полета, когда эффект непрерывности выполнялся, а также общее время полета.

На четвертом этапе вычисляют вероятность непрерывного наблюдения за территорией во время полета БПЛА

$$P_n = t_n / t_{\text{п}}.$$

Здесь t_n — время полета, при котором выполнялся эффект непрерывности; $t_{\text{п}}$ — общее время полета,

$$t_n = t_{\text{п}} - \sum_{i=0}^{\infty} t_i^{\text{н.н.}}; \quad t_i^{\text{н.н.}} = k_i t_{\text{п} i};$$

$$k_i = \begin{cases} 0, & S_{cr} \leq S_{\text{тр max}} \wedge S_{cr} \geq S_{\text{тр min}}; \\ 1, & S_{cr} > S_{\text{тр max}} \vee S_{cr} < S_{\text{тр min}}, \end{cases}$$

где $t_i^{\text{н.н.}}$ — время невыполнения условия непрерывности наблюдения; k_i — индикатор выполнения условия непрерывности на i -м временном отрезке; $t_{\text{п} i}$ — время полета на i -м отрезке.

Выполнение эффекта непрерывности будет зависеть от характеристик оптического сред-

ства наблюдения БПЛА, а также от дистанции между ними.

В качестве модели управления полетом БПЛА выбирают модифицированную общепринятую модель полета БПЛА [11–13] с учетом влияния внешних возмущающих факторов

$$\dot{x} = f(x, u, w, t), t \in [t_0, t_k]; x(t_0) = x_0,$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — вектор состояния ЛА, называемый вектором фазовых координат БПЛА; $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ — управляемый вектор; $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ — вектор внешних воздействий на БПЛА; $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ — вектор-функция своих аргументов; $[t_0, t_k]$ — интервал времени t , на котором выполняется полет БПЛА.

Наиболее сильное внешнее воздействие на БПЛА оказывает такое атмосферное возмущение, как ветер. Суммарный вектор скорости имеет вид [14]

$$V_w = V_{W_s} + V_{W_g},$$

где V_{W_s} — постоянный вектор, который представляет собой скорость ветра устойчивого направления; V_{W_g} — стохастическая составляющая, описывающая воздушные порывы и другие атмосферные возмущения.

Ветер и атмосферные возмущения воздействуют на скорость воздушной массы, углы атаки и бокового скольжения, тем самым оказывая влияние на движение БПЛА [14]. Следует отметить, что значительно большее воздействие ветер оказывает на малые БПЛА, для которых скорость ветра составляет 20...50 % воздушной скорости. В некоторых исследованиях утверждается, что когда скорость БПЛА превышает скорость ветра и составляет более 90 км/ч, возмущающим воздействием ветра можно пренебречь [15].

Рассмотрим два варианта для расчета дистанции между БПЛА, при которой будет соблюдаться условие непрерывности наблюдения.

Вариант 1. БПЛА обладают одинаковыми оптическими средствами наблюдения, полет совершают на одной высоте один за другим (рис. 5).

Расстояние между БПЛА

$$R(t) = L_v(t) - \frac{S_{cr}(t)}{L_h(t)} + W_R(t),$$

где $L_v(t)$ — размер наблюдаемой зоны по вертикали (меньшая сторона); $L_h(t)$ — размер

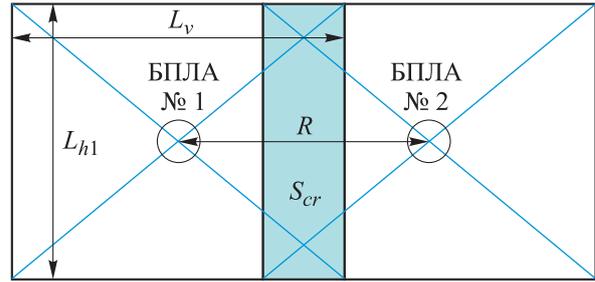


Рис. 5. Схема полета БПЛА на одной высоте

наблюдаемой зоны по горизонтали (большая сторона); $S_{cr}(t)$ — площадь пересечения зон наблюдения; $W_R(t)$ — случайные вариации расстояния между БПЛА.

Площадь пересечения зон наблюдения

$$S_{cr}(t) = \frac{S(t)S_{crp}}{100} + W_S(t),$$

где $S(t)$ — площадь наблюдаемой территории одним БПЛА; S_{crp} — необходимый процент перекрытия зон наблюдения; $W_S(t)$ — случайные вариации площади пересечения зон наблюдения.

Вариант 2. БПЛА совершают полет один за другим, но размеры зон наблюдения могут различаться вследствие неодинаковых характеристик (параметров) оптических средств наблюдения или из-за разной высоты полета (рис. 6).

При втором варианте полета БПЛА расстояние между центрами определяется как

$$R(t) = \frac{1}{2}L_{v1}(t) + \frac{1}{2}L_{v2}(t) - \frac{S_{cr}(t)}{L_{hmin}(t)} + W_R(t),$$

где $L_{v1}(t)$ и $L_{v2}(t)$ — размеры наблюдаемой зоны по вертикали первого и второго БПЛА; $L_{hmin}(t)$ — минимальный размер наблюдаемой зоны по горизонтали,

$$L_{hmin}(t) = \begin{cases} L_{h1} & \text{при } L_{h1} < L_{h2}; \\ L_{h2} & \text{при } L_{h2} < L_{h1}. \end{cases}$$

где L_{h1} и L_{h2} — размеры наблюдаемой зоны по горизонтали первого и второго БПЛА.

БПЛА могут иметь разные оптические системы наблюдения. Также во время полета можно использовать функцию оптического приближения, при котором изменяется размер наблюдаемой зоны. Для обеспечения максимальной эффективности съемки, при которой зоны пересечения по горизонтали у летящих БПЛА одинакового размера, необходимо определить высоту полета (рис. 7).

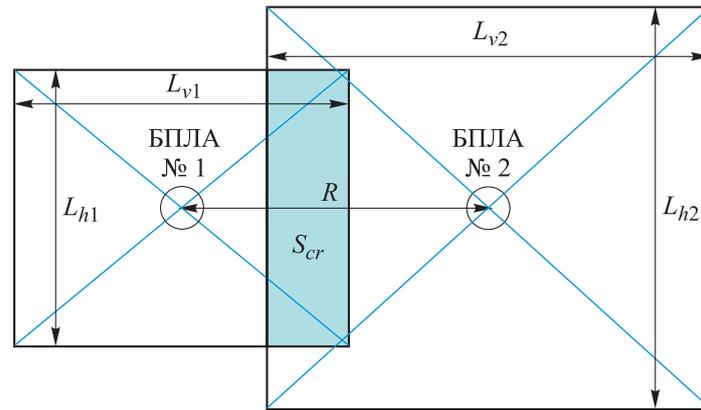


Рис. 6. Схема полета БПЛА на разной высоте

Предполагаем, что БПЛА № 1 летит с неизменной (эталонной) высотой. Тогда высоту полета БПЛА № 2 можно вычислить по формуле

$$h_2(t) = \frac{h_1(t) \operatorname{tg} \frac{\alpha_{v1}(t)}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_{v2}(t)}{2}} + W_h(t),$$

где $h_1(t)$ — высота полета БПЛА № 1; $\alpha_{v1}(t)$ и $\alpha_{v2}(t)$ — углы обзора камеры по вертикали первого и второго БПЛА; $W_h(t)$ — случайные вариации разности высоты полета БПЛА.

Приведенный вариант полета роя БПЛА предполагает определение координат во время полета с помощью спутниковых навигационных систем GPS, GLONASS и др. [16]. Для определения высоты $h_n(t)$ применяют навигационную систему и датчик абсолютного давления. В каждый момент времени ЛА будут соответ-

ствовать значения координат X , Y , Z , а также значения эйлеровых углов — рыскания ψ , тангажа θ и крена φ .

После моделирования полета группы БПЛА на выходе получают трек-запись, включающую в себя координаты полета, эйлеровы углы и временные отметки. После чего с помощью предложенного алгоритма расчета вероятности непрерывного наблюдения выполняют расчет процента перекрытия зон наблюдения, а затем вероятности непрерывного наблюдения на протяжении всего полета.

Анализ приведенной модели позволяет выделить два основных контролируемых параметра: расстояние между центрами БПЛА R и высоту второго БПЛА h_2 с учетом высоты первого, которые необходимо контролировать в процессе полета группы БПЛА. Поддержание их в требуемых пределах в условиях воздействия возмущающих факторов обеспечит реализацию целевого эффекта непрерывности наблюдения с требуемой эффективностью: $P_n \rightarrow 1$.

Дальнейшим шагом является разработка методов автономного определения указанных параметров с требуемой точностью и алгоритмов управления ведомого БПЛА относительно ведущего, которые могут быть реализованы на борту БПЛА.

Рассмотренный целевой эффект непрерывности наблюдения, с одной стороны, можно реализовать путем совместного выполнения БПЛА типовых технологических операций, таких как взлет, посадка, разворот, изменение скорости, высоты полета и др. С другой стороны, он послужит основой для реализации заданных эпизодов и сценариев применения групп БПЛА.

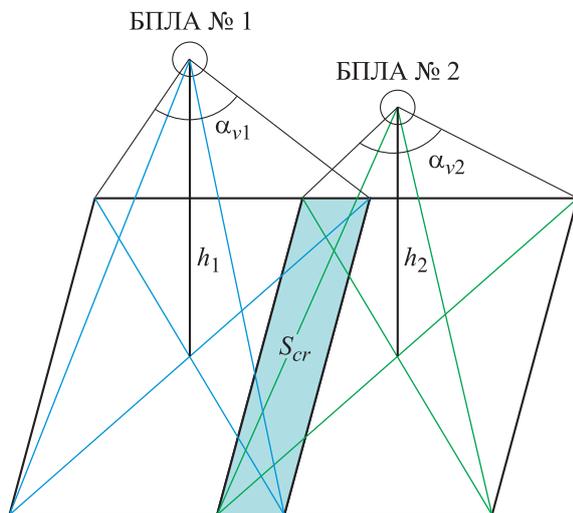


Рис. 7. Схема выбора оптимальной высоты полета БПЛА

Выводы

1. Применение БПЛА в формате роя открывает широкие возможности по реализации различных сценариев применения, в том числе мониторинга территорий. Рассмотренный подход к вариантам функционирования отдельных элементов роя БПЛА представляется перспективным для разработки алгоритмов управления комплексом в целом. Предложенные алгоритмы можно использовать в системах управления БПЛА мультироторного и самолетного типов.

2. В дальнейшем целесообразно разработать алгоритмы автономного определения парамет-

ров взаимного положения БПЛА с требуемой точностью и алгоритмов управления ведомого БПЛА относительно ведущего, которые могут быть реализованы на борту БПЛА в условиях ограниченных вычислительных мощностей.

3. Реализация предложенного подхода к организации функционирования групп БПЛА на основе целевых технологических эффектов позволит выстроить групповые алгоритмы взаимодействия и в перспективе автоматизировать процессы планирования и использования роботизированных систем, повысить автономность функционирования БПЛА и увеличить эффективность их применения.

Литература

- [1] Пшихопов В.Х., Гонтарь Д.Н., Мартянов О.В. Концептуальные подходы к формированию сценариев боевого применения групп робототехнических комплексов. *Системы управления, связи и безопасности*, 2022, № 3, с. 138–182, doi: <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-3-138-182>
- [2] Casbeer D., Beard R., McLain T.V. et al. Forest fire monitoring with multiple small UAVs. *Proc. American Control Conf.*, 2005, vol. 3, pp. 3530–3535, doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470520>
- [3] Puri A., Valavanis K.P., Kontitsis M. Statistical profile generation for traffic monitoring using real-time UAV based video data. *Mediterranean Conf. Control & Automation*, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433658>
- [4] Purohit A., Zhang P. Controlled-mobile sensing simulator for indoor fire monitoring. *Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf.*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2011.5982698>
- [5] Kingston D., Beard R.W., Holt R.S. Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs. *IEEE Trans. Robot.*, 2008, vol. 24, no. 6, pp. 1394–1404, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2007935>
- [6] Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков И.Л. и др. Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2011, № 11, с. 27–32.
- [7] Chandra R., D’Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles. *American Control Conf.*, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.2006.1657272>
- [8] Tonetti S., Hehn M., Lupashin S. et al. Distributed control of antenna array with formation of UAVs. *IFAC Proc. Vol.*, 2011, vol. 44, no. 1, pp. 7848–7853, doi: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02460>
- [9] Потюпкин А.Ю., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2021, т. 8, № 3, с. 11–19, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19>
- [10] Шилов К.Е. Разработка системы автоматического управления беспилотным аппаратом мультироторного типа. *Труды МФТИ*, 2014, т. 6, № 4, с. 139–152.
- [11] Куршев Н.В., Кожевников Ю.В. *Оптимальные задачи динамики полета*. Казань, Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010. 324 с.
- [12] Моисеев В.С. *Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами*. Казань, РЦМКО, 2013. 768 с.
- [13] Stengel R.F. *Flight dynamics*. Princeton University Press, 2022. 912 p.
- [14] Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. *Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика*. Москва, Техносфера, 2019. 312 с.

- [15] Санько А.А., Рожков И.В., Шейников А.А. Влияние ветра на систему угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата. *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*, 2019, № 1. URL: <http://if-mstuca.ru/CE/index.php/2019-1/bas>
- [16] Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P. *Global positioning systems, inertial-navigation, and integration*. Wiley, 2007. 552 p.

References

- [1] Pshikhopov V.Kh., Gontar D.N., Martyanov O.V. Conceptual approaches to the formation of scenarios for the combat use of groups of robotic systems. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2022, no. 3, pp. 138–182, doi: <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-3-138-182> (in Russ.).
- [2] Casbeer D., Beard R., McLain T.V. et al. Forest fire monitoring with multiple small UAVs. *Proc. American Control Conf.*, 2005, vol. 3, pp. 3530–3535, doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470520>
- [3] Puri A., Valavanis K.P., Kontitsis M. Statistical profile generation for traffic monitoring using real-time UAV based video data. *Mediterranean Conf. Control & Automation*, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433658>
- [4] Purohit A., Zhang P. Controlled-mobile sensing simulator for indoor fire monitoring. *Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf.*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2011.5982698>
- [5] Kingston D., Beard R.W., Holt R.S. Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs. *IEEE Trans. Robot.*, 2008, vol. 24, no. 6, pp. 1394–1404, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2007935>
- [6] Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyazkov I.L. et al. Design of moving communication network on the base of ground autonomous mobile robots. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2011, no. 11, pp. 27–32. (In Russ.).
- [7] Chandra R., D’Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles. *American Control Conf.*, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.2006.1657272>
- [8] Tonetti S., Hehn M., Lupashin S. et al. Distributed control of antenna array with formation of UAVs. *IFAC Proc. Vol.*, 2011, vol. 44, no. 1, pp. 7848–7853, doi: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02460>
- [9] Potyupkin A.Yu., Timofeev Yu.A., Volkov S.A. Group control of multisatellite orbital grouping based on the concept of joint operating modes. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2021, vol. 8, no. 3, pp. 11–19, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19> (in Russ.).
- [10] Shilov K.E. Development of the system of automatic control of the unmanned aerial vehicle multirotor. *Trudy MFTI* [Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology], 2014, vol. 6, no. 4, pp. 139–152. (In Russ.).
- [11] Kurshev N.V., Kozhevnikov Yu.V. *Optimalnye zadachi dinamiki poleta* [Optimal flight dynamics problems.]. Kazan, Izd-vo KGTU im. A.N. Tupoleva Publ., 2010. 324 p. (In Russ.).
- [12] Moiseev V.S. *Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatelnyimi apparatami* [Applied control theory of unmanned aerial vehicles]. Kazan, RTsMKO Publ., 2013. 768 p. (In Russ.).
- [13] Stengel R.F. *Flight dynamics*. Princeton University Press, 2022. 912 p.
- [14] Beard R.W., McLain T.W. *Small unmanned aircraft: theory and practice*. Princeton University Press, 2012. 320 p. (Russ. ed.: *Malye bespilotnye letatelnye apparaty: teoriya i praktika*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2019. 312 p.)
- [15] Sanko A.A., Rozhkov I.V., Sheynikov A.A. Wind influence on the angular stabilization system of the unmanned aerial vehicle. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk* [Crede Experto: Transport, Society, Education, Language], 2019, no. 1. URL: <http://if-mstuca.ru/CE/index.php/2019-1/bas> (In Russ.).
- [16] Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P. *Global positioning systems, inertial-navigation, and integration*. Wiley, 2007. 552 p.

Информация об авторах

МЕЩЕРЯКОВ Андрей Константинович — адъюнкт кафедры испытаний и применения систем оружия. Военная академия РВСН им. Петра Великого (143900, Балашиха, Российская Федерация, ул. Карбышева, д. 8, e-mail: andrew.mescheryakov@gmail.com).

ПОТЮПКИН Александр Юрьевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры испытаний и применения систем оружия. Военная академия РВСН им. Петра Великого (143900, Балашиха, Российская Федерация, ул. Карбышева, д. 8, e-mail: fotin853@mail.ru).

Information about the authors

MESCHERYAKOV Andrey Konstantinovich — Postgraduate, Department of Weapon Systems Testing and Employment. Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Forces (143900, Balashikha, Russian Federation, Karbysheva St., Bldg. 8, e-mail: andrew.mescheryakov@gmail.com).

POTYUPKIN Alexander Yurievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Department of Weapon Systems Testing and Employment. Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Forces (143900, Balashikha, Russian Federation, Karbysheva St., Bldg. 8, e-mail: fotin853@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мещеряков А.К., Потюпкин А.Ю. Организация функционирования групповых роботизированных систем БПЛА на основе целевых технологических эффектов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 10, с. 20–29.

Please cite this article in English as:

Mescheryakov A.K., Potyupkin A.Y. Organizing the group robotic UAV systems operation based on the targeted technological effects. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 10, pp. 20–29.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие

«Расчет и проектирование сетчатых композитных конструкций»

Авторы: А.В. Азаров, А.Ф. Разин

Рассмотрены вопросы, связанные с расчетом и проектированием сетчатых композитных конструкций, применяемых в ракетно-космической технике в качестве отсеков ракет-носителей, адаптеров полезной нагрузки, корпусов космических аппаратов и элементов развертываемых космических антенн.

Для студентов магистратуры, обучающихся по специальностям «Ракетные комплексы и космонавтика» (24.04.01) и «Материаловедение и технологии материалов» (22.04.01) на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Пособие может быть полезно аспирантам, научным работниками инженерам в области разработки и изготовления композитных конструкций.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>