

УДК 519.7

Цифровой двойник группы беспилотных летательных аппаратов

Деревич Игорь Владимирович

DerevichIgor@bmstu.ru

Панова Анастасия Андреевна

Panova005@gmail.com

Брегадзе Зураб

bregadze.zurab@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Предлагается метод управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе нелокального потенциала в виртуальном пространстве. Управляющие сигналы на контроллеры аппаратов передаются с компьютера одного оператора и являются результатом имитации полета цифрового двойника группы в виртуальном пространстве, имитирующем реальные условия выполнения миссии. Динамика каждого аппарата регулируется эффективным нелокальным виртуальным потенциалом, обеспечивающим транспорт группы в заданном коридоре полета к цели и исключающем столкновения аппаратов между собой. Представлена математическая модель цифрового двойника группы. В качестве примера иллюстрируется виртуальный полет группы беспилотных аппаратов в длинном коридоре со случайно расположенными колоннами.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, стохастическое обыкновенное дифференциальное уравнение, силовой потенциал, случайный процесс, алгоритм Verlet

A digital twin of a group of unmanned aerial vehicles

Derevich Igor Vladimirovich

DerevichIgor@bmstu.ru

Panova Anastasiya Andreevna

Panova005@gmail.com

Bregadze Zurab

bregadze.zurab@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This article proposes a method for controlling the flight of a swarm of unmanned aerial vehicles (UAV) based on a nonlocal potential in virtual space. Control signals are transmitted to the UAV controllers from a single operator computer and are the result of simulating the flight of a digital twin of the swarm within a specified virtual flight corridor. The flight of each UAV is controlled by an effective nonlocal virtual potential, which ensures the swarm's movement within the specified flight corridor toward the mission goal and prevents collisions between UAVs. A mathematical model of the swarm's digital twin is presented, using methods of random process theory. An example of a virtual swarm flight in a long corridor with randomly located columns is given, algorithm Verlet.

Keywords: unmanned aerial vehicles, stochastic ordinary differential equation, force potential, random process

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяются для решения военных и народнохозяйственных задач. Достижение поставленных целей связано с транспортном аппаратов к цели миссии. Для решения локальных задач использование дорогостоящих аппаратов самолетного типа с высококвалифицированным программным обеспечением нерационально. Для достижения локальных целей эффективно использование сравнительно недорогих БПЛА, объединенных в группу [1–4]. Управление каждым БПЛА отдельным оператором приводит к несогласованности действий и возможным авариям, связанным со столкновениями аппаратов друг с другом. Разработка единой программной реализации полетного задания для каждого аппарата в группе требует привлечения высококвалифицированных специалистов и существенных затрат времени. Кроме того, модификация разработанного компьютерного кода может быть невыполнима при изменении обстановки полета во время транспортировки группы.

В работе предложена модель цифрового двойника группы БПЛА в виртуальном пространстве, отражающем реальные условия транспорта. Реализация проекта не использует идеи искусственного интеллекта. Коллективное поведение группы создается нелокальным виртуальным потенциалом, удерживающим аппараты в коридоре полета и предотвращающим столкновения аппаратов с внутренними препятствиями и друг с другом. В виртуальном пространстве силы взаимодействия между аппаратами и границей коридора полета могут действовать на сотни метров, что нереально в физическом пространстве. Виртуальный сценарий полета генерируется на компьютере оператора и управляющие сигналы передаются на контролеры каждого аппарата. Информация о скорости движения и координатах каждого аппарата поступает на компьютер. В результате решения системы дифференциальных уравнений вычисляется новое значение скорости и координат аппаратов. После цифрового описания коридора полета, возможных препятствий и координат цели оператор не вмешивается в транспорт группы. Аппараты не обмениваются информацией между собой, что делает их менее заметными.

Математическая модель. Аппарат с номером α моделируется жесткой сферой радиуса $\delta^{(\alpha)}$. Система уравнений, описывающая динамику аппарата α , имеет вид

$$\frac{d\mathbf{V}^{(\alpha)}}{dt} = \frac{1}{\tau^{(\alpha)}} (\mathbf{G}^{(\alpha)} + \mathbf{V}_{\text{rnd}}^{(\alpha)} - \mathbf{V}^{(\alpha)}) + \underbrace{\frac{1}{m^{(\alpha)}} \left(-\frac{\partial U_{\text{eff}}^{(\alpha)}(\Delta \mathbf{r})}{\partial \Delta \mathbf{r}} \frac{\partial \Delta \mathbf{r}}{\partial \mathbf{r}} \right)}_{\mathbf{F}(\mathbf{R}^{(\alpha)}, t)} \bigg|_{\mathbf{r}=\Delta \mathbf{R}^{(\alpha)}}; \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{R}^{(\alpha)}}{dt} = \mathbf{V}^{(\alpha)}; \quad \mathbf{V}^{(\alpha)}(0) = \mathbf{V}_0^{(\alpha)}; \quad \mathbf{R}^{(\alpha)}(0) = \mathbf{R}_0^{(\alpha)}. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{V}^{(\alpha)}, \mathbf{R}^{(\alpha)}$ — скорость и координата аппарата; $\tau^{(\alpha)}$ — динамическое время релаксации; $m^{(\alpha)}$ — масса аппарата; $\mathbf{G}^{(\alpha)}$ — заданная скорость дрейфа,

всегда направленная на цель; $\mathbf{V}_{\text{md}}^{(\alpha)}$ — случайная компонента скорости; $U_{\text{eff}}^{(\alpha)}(\Delta r)$ — виртуальный эффективный потенциал; $\mathbf{F}(\mathbf{R}^{(\alpha)}, t)$ — виртуальная сила, действующая на аппарат; Δr — модуль относительного кратчайшего расстояния между поверхностью аппарата и препятствием; $\Delta \mathbf{R}^{(\alpha)}$ — вектор относительного расстояния между центром аппарата и препятствием.

Желаемая скорость БПЛА складывается из заданного детерминированного дрейфа к цели и случайной компоненты. В результатах расчетов показано, что случайная компонента скорости обеспечивает самосогласованный характер движения группы.

Отдельный аппарат достигнет желаемой скорости полета через некоторое время релаксации $\tau^{(\alpha)}$, которое зависит от его массы и конструктивных особенностей. В результате коллективной динамики группы аппаратов реальная скорость существенно искажается по сравнению с желаемой. Коллективная динамика учитывается нелокальным виртуальным потенциалом, который складывается из локальных потенциалов отталкивания аппаратов друг от друга и отталкивания от виртуальной границы маршрутного канала

$$U_{\text{eff}}^{(\alpha)}(\Delta \mathbf{R}) = \sum_{\beta \neq \alpha}^{N_0} U_{\text{rep}}(\Delta \mathbf{R}^{(\alpha\beta)}) + U_{\text{wall}}^{(\alpha)}(\Delta \mathbf{R}_w^{(\alpha)}). \quad (3)$$

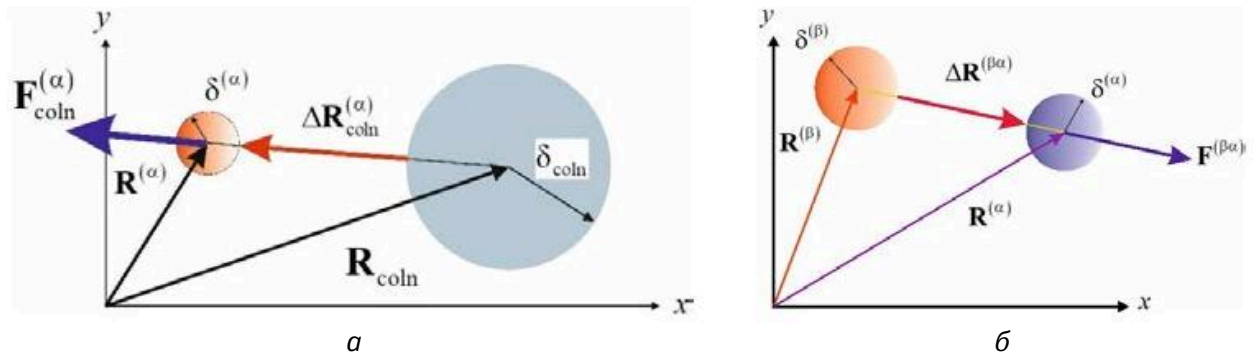


Рис. 1. Схема расчета относительного расстояния:
 а — между поверхностью аппарата и колонны; б — двух аппаратов

На рис. 1 показана схема расчета относительного расстояния между поверхностью аппарата, поверхностью колонны (а) и между двумя аппаратами (б). Потенциал отталкивания зависит от модуля кратчайшего расстояния между поверхностью аппарата и препятствия. Например, для колонны потенциал отталкивания имеет вид

$$U_{\text{coln}}(|\Delta \mathbf{R}_{\text{coln}}^{(\alpha)}|) = A_{\text{coln}}^{(W)} \exp \left[\frac{\delta_{\text{coln}}^{(\alpha)*}}{|\Delta \mathbf{R}_{\text{coln}}^{(\alpha)}|} - \frac{|\Delta \mathbf{R}_{\text{coln}}^{(\alpha)}|}{\delta_{\text{coln}}^{(\alpha)*}} \right]^{\sigma_W} \quad \delta_{\text{coln}}^{(\alpha)*} = \frac{1}{\delta_{\text{coln}}} + \frac{1}{\delta^{(\alpha)}} \quad (4)$$

Здесь $A_{\text{coln}}^{(w)}$ — константа потенциала отталкивания; σ_w — показатель, регулирующий локализацию потенциала вблизи препятствия.

Из формулы (4) видно, что по мере сближения поверхностей БПЛА и препятствия потенциал отталкивания сверхэкспоненциально растет. При удалении аппарата от препятствия потенциал экспоненциально затухает.

Случайная компонента скорости $V_{\text{md}}^{(\alpha)}(t)$ генерируется аналогично [5]. Система уравнений (1)–(4) интегрируется численно методом Verlet [6].

Результаты моделирования. На рис. 2 представлен суммарный эффективный потенциал отталкивания аппарата от стен прямоугольной галереи со случайно расположенными колоннами. Расчет траектории аппарата проведен без учета случайной компоненты скорости $V_{\text{md}}^{(\alpha)} = 0$. Датчиком случайных чисел задается начальное расположение и скорость аппарата. Модуль скорости дрейфа во время расчета не меняется, Вектор скорости дрейфа аппарата всегда направлен на цель.

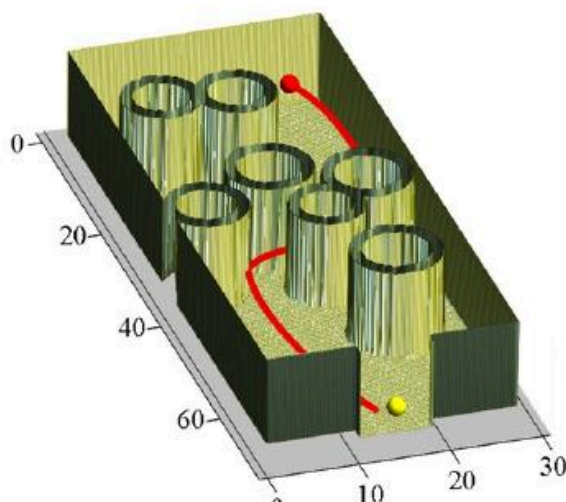


Рис. 2. Потенциал отталкивания от случайно расположенных колонн и стенок галереи. Все расстояния в метрах. Показано начальное расположение аппарата (красная точка), его траектория к цели (линия) и сама цель (желтая точка) на выходе из галереи. Расчет проведен для детерминированного движения аппарата

На рис. 2 видно, что суммарный нелокальный эффективный потенциал приводит к обтеканию аппаратом внутренних препятствий и выходу к цели. В расчетах модуль скорости дрейфа $G^{(\alpha)} = 7 \text{ m/s}$, время динамической релаксации $\tau^{(\alpha)} = 3 \text{ s}$, масса аппарата $m^{(\alpha)} = 7 \text{ kg}$, начальный вектор скорости выбирался датчиком случайных чисел.

На рис. 3 иллюстрируется влияние среднеквадратичной амплитуды случайной скорости $V_{\text{md}}^{(\alpha)}$ на траектории в галерее с колоннами (а) и среднее время движения аппарата к цели (б). Среднее значение времени достижения цели рассчитывалось по десяти реализациям. Начальное значение случайной

скорости $V_{\text{md}}^{(\alpha)} = 0$. Предполагается, что аппарат, пересекающий границу галереи вблизи цели, исчезает.

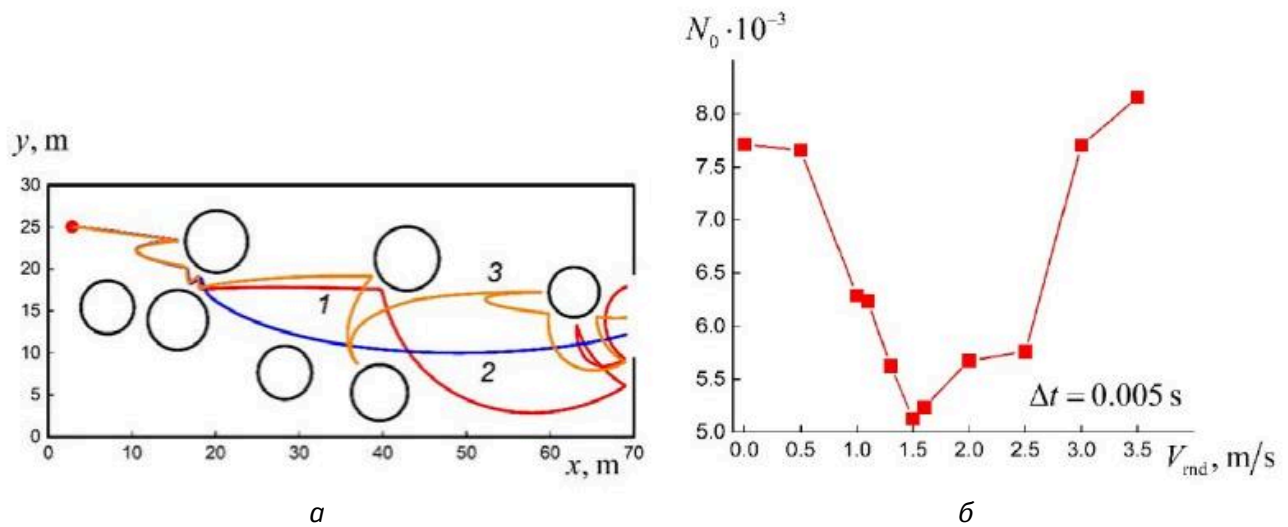


Рис. 3. а — траектории одиночного аппарата в галерее с колоннами. Цель расположена на выходе из галереи. Среднеквадратичные значения скорости случайной компоненты:

1 — $V_{\text{md}}^{(\alpha)} = 0$; 2 — 1,5 м/с; 3 — 3,5 м/с; б — среднее число шагов по времени N_0 к цели в зависимости от амплитуды случайной скорости, Δt — шаг интегрирования по времени и зависимость числа шагов по времени

Видно, что среднее время достижения цели немонотонно зависит от амплитуды случайной скорости. Существует оптимальное значение амплитуды случайной компоненты, минимизирующее время полета. При увеличении хаотической скорости наблюдается рост столкновений аппарата с препятствиями. Под «столкновением» понимается резкое изменение траектории при попадании аппарата в зону растущего потенциала отталкивания.

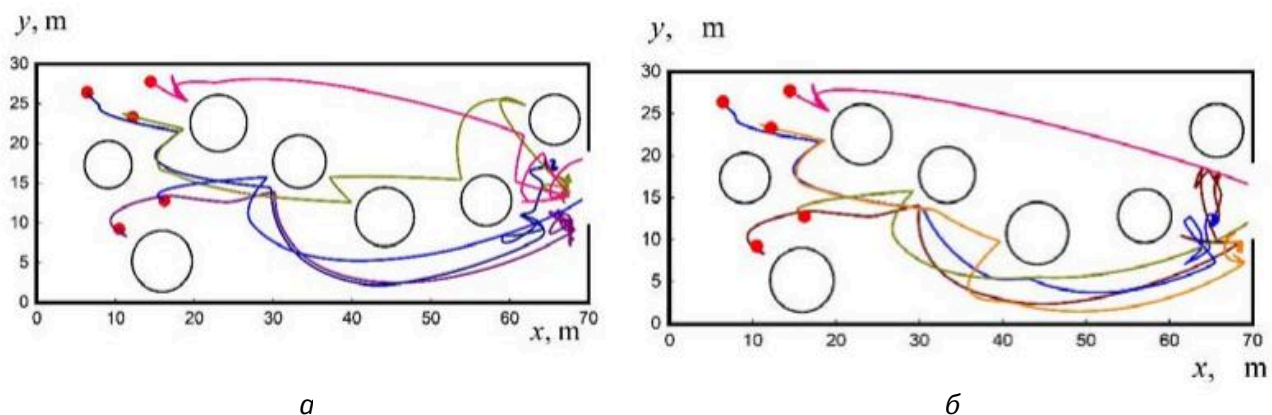


Рис. 4. Траектории аппаратов в галерее:

а — в детерминированном случае; б — с учетом случайной компоненты скорости

На рис. 4 представлены траектории пяти аппаратов в галерее со случайно расположенными колоннами. Параметры аппаратов выбирались случайным обра-

зом в следующих диапазонах: $G^{(\alpha)} \in [5, 7] \text{ m/s}$, $\tau^{(\alpha)} \in [3, 5] \text{ s}$, $V^{(\alpha)} \in [5, 7] \text{ m/s}$, $m^{(\alpha)} \in [7, 10] \text{ kg}$. Для детерминированного случая наблюдаются частые столкновения аппаратов с колоннами и между собой в конце галереи. Добавление случайной компоненты скорости $V_{\text{rnd}}^{(\alpha)} \in [1, 3] \text{ m/s}$ приводит к более гладким траекториям и снижению частоты столкновений вблизи цели.

Заключение. Представлена модель цифрового двойника группы БПЛА в виртуальном пространстве. Самосогласованное поведение группы реализуется в оригинальном нелокальном потенциале, удерживающем аппараты в коридоре полета и предотвращающем столкновения БПЛА друг с другом. Скорость аппаратов регулируется заданной скоростью дрейфа, всегда направленной к цели, эффективным силовым потенциалом и случайной компонентой, позволяющей оптимизировать время движения группы к цели. Представлены результаты модельных расчетов полета группы в галерее со случайно расположенными колоннами.

Список источников

- [1] Бумай А.Ю. Методы построения траекторий движения беспилотных летательных аппаратов при облете заданных областей пространства. *Системный анализ и прикладная информатика*, 2024, № 2, с. 25–29. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2024-2-25-29>
- [2] Tao Y., Gao H., Ren F. et al. A Mobile service robot global path planning method based on ant colony Optimization and Fuzzy Control. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, art. no. 3605. <https://doi.org/10.3390/app11083605>
- [3] Anderson C., Fernandez-Nieves A. Social interactions lead to motility-induced phase separation in fire ants. *Nat. Commun.*, 2022, vol. 13, art. no. 6710. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34181-0>
- [4] Чжу Ю. Формирование управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма многоагентной модели роя. *Информатика, телекоммуникации и управление*, 2022, т. 15, № 4, с. 22–36. <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15402>
- [5] Деревич И.В., Панова А.А. Стохастическая модель движения группы индивидов в ограниченном пространстве с учетом их социального поведения. *Математическое моделирование*, 2023, т. 35, № 6, с. 51–62. <https://doi.org/10.20948/mm-2023-06-04>
- [6] Leimkuhler B., Matthews C. *Molecular Dynamics with Deterministic and Stochastic Numerical Methods*. Springer, 2015, 461 p.