

УДК 519.7

Управление динамикой группы БПЛА с помощью виртуального потенциала

Деревич Игорь Владимирович^(*) derevichigor@bmstu.ru
Панова Анастасия Андреевна panova005@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлена математическая модель автономного управления транспортом группы БПЛА одним оператором. Сигналы управления на контроллеры БПЛА вырабатываются в результате расчета виртуальной стохастической динамики системы аппаратов в нелокальном силовом потенциале, предохраняющем аппараты от столкновения друг с другом и обеспечивающим транспорт в заданном коридоре при наличии локальных областей с повышенной концентрацией БПЛА или зон опасных для полета. Представлены результаты модельных расчетов.

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

Controlling the dynamics of a UAV group using virtual potentials

Derevich Igor Vladimirovich^(*) derevichigor@bmstu.ru
Panova Anastasiia Andreevna panova005@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. A mathematical model of autonomous transportation control of a group of UAVs by a single operator computer is presented. The control signals to the UAV controllers are generated as a result of calculating the virtual stochastic dynamics of the UAV system in a non-local force potential that protects the UAVs from colliding with each other and provides transportation in a given corridor in the presence of local areas with increased concentration of UAVs or area dangerous to flying. The results of model simulations are presented.

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

Введение. Группы БПЛА применяются в народнохозяйственной и военной практике. Определяющим фактором выполнения миссии является транспорт аппаратов к цели. Полет аппаратов должен проходить по заданному маршруту без столкновения аппаратов друг с другом при условии обтекания зон опасных для посещения. Для выполнения этих требований БПЛА самолетного типа требуются дорогостоящие бортовые компьютеры и высококвалифицированное программное обеспечение [1–5].

Эффективно использование групп недорогих малых и средних аппаратов. Управляющие сигналы на контроллеры БПЛА генерируются группой опера-

торов или заранее созданной компьютерной программой. Увеличение числа аппаратов в группе требует большего количества операторов или существенного усложнения программной реализации.

В настоящее время для создания сценария полета группы БПЛА используются аналогии с самоорганизацией коллективов живой и неживой материи. Как правило, это детерминированные модели, в которых для управления обходом препятствий и предохранения аппаратов от столкновения друг с другом используется сложный математический аппарат или набор полуэмпирических правил с большим числом условных операторов [6–13]. Перспективна технология генерации управляющих сигналов в виртуальном пространстве с последующей их передачей на контроллеры аппаратов [14–15].

Цель работы — создание простой математической модели управления группой БПЛА с компьютера одного оператора. Новизна модели заключается в описании требуемого коридора полета группы и исключения столкновения аппаратов между собой с помощью оригинального нелокального виртуального потенциала притяжения или отталкивания с универсальной функциональной формой. Принципиальным отличием предлагаемой модели от существующих в литературе является использование идей случайных процессов для поиска самосогласованных траекторий при обходе препятствий и избегания столкновения аппаратов друг с другом. Траектории аппаратов не описываются детерминированным образом, а являются результатом решения системы стохастических обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ). При неизменной обстановке полета это приводит к простой реализации управляющих сигналов на контроллеры аппаратов без участия оператора. В случае изменения условий транспорта группы достаточно изменить профиль виртуального потенциала. Предложенный алгоритм не накладывает ограничений на число аппаратов в группе.

Математическая модель. Аппарат с номером α моделируется жесткой сферой с радиусом $\delta^{(\alpha)}$. Желаемая скорость БПЛА складывается из заданного детерминированного дрейфа к цели и случайной компоненты. 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, а также из потенциалов притяжения или отталкивания в опасных или притягательных зонах маршрутного коридора.

Потенциал отталкивания аппаратов α и β зависит от модуля кратчайшего расстояния между поверхностями аппаратов $\Delta \mathbf{R}^{(\alpha\beta)} = \mathbf{R}^{(\alpha)} - \mathbf{R}^{(\beta)}$ (рис. 1, а). На рис. 1, б показано относительное расстояние между центром локальной притягивающей сферической области с радиус-вектором $\mathbf{R}_{\text{attr}}$ и радиус-

вектором БПЛА $\Delta \mathbf{R}_{\text{attr}}^{(\alpha)} = \mathbf{R}^{(\alpha)} - \mathbf{R}_{\text{attr}}$ ($\delta_{\text{attr}} \gg \delta^{(\alpha)}$). Эффективный виртуальный потенциал $U_{\text{eff}}^{(\alpha)}$, в котором движется аппарат, имеет вид

$$U_{\text{eff}}^{(\alpha)}(\Delta \mathbf{R}) = \sum_{\beta \neq \alpha}^{N_0} U_{\text{rep}}(\Delta \mathbf{R}^{(\alpha\beta)}) + \sum_{\text{wall}} U_{\text{wall}}(\Delta \mathbf{R}_{\text{wall}}^{(\alpha)}) + U_{\text{attr}}(\Delta \mathbf{R}_{\text{attr}}^{(\alpha)}). \quad (1)$$

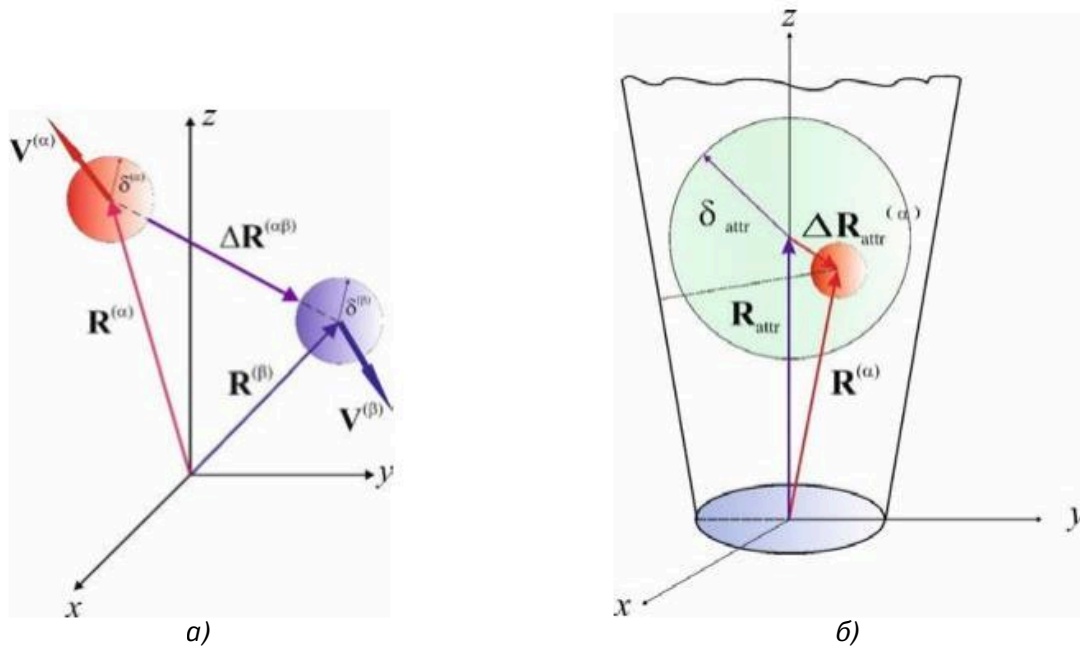


Рис. 1. Схема расчета:

a — относительного расстояния между поверхностями двух аппаратов; b — относительного расстояния между центром виртуальной притягивающей области и центром аппарата

Первое слагаемое в (1) обеспечивает отсутствие столкновения БПЛА друг с другом, второе слагаемое удерживает аппараты в заданном коридоре, третье слагаемое учитывает области локального притяжения или отталкивания. Потенциал отталкивания между границами аппаратов равен

$$U_{\text{rep}}(\Delta \mathbf{R}^{(\alpha\beta)}) = A^{(\alpha\beta)} \exp \left\{ \left(\frac{\delta^{(\alpha\beta)}}{|\Delta \mathbf{R}^{(\alpha\beta)}|} \right)^{\sigma^{(\alpha\beta)}} - \left(\frac{|\Delta \mathbf{R}^{(\alpha\beta)}|}{\delta^{(\alpha\beta)}} \right)^{\sigma^{(\alpha\beta)}} \right\}, \quad (2)$$

где $\delta^{(\alpha\beta)} = \delta^{(\alpha)} + \delta^{(\beta)}$, коэффициент $\sigma^{(\alpha\beta)} > 0$ отвечает за локализацию потенциала в пространстве.

При сближении поверхностей аппаратов $|\Delta \mathbf{R}^{(\alpha\beta)}| \rightarrow 0$ потенциал (2) сверх экспоненциально стремится к бесконечности. При удалении БПЛА друг от друга потенциал отталкивания (2) уменьшается до нуля. Параметр $A^{(\alpha\beta)} = 1500$ Дж оценивается как кинетическая энергия, например, двух БПЛА массой 10 кг, движущихся навстречу друг другу со скоростью 30 км/ч. Потенциал локальной области притяжения БПЛА имеет вид

$$U_{\text{attr}}(\Delta \mathbf{R}_{\text{attr}}^{(\alpha)}) = A_{\text{attr}} \exp \left\{ - \left(\frac{\delta_{\text{attr}}}{|\Delta \mathbf{R}_{\text{attr}}^{(\alpha)}|} \right)^{\sigma_{\text{attr}}} \right\}. \quad (3)$$

Здесь в случае притяжения $\sigma_{\text{attr}} > 0$, $A_{\text{attr}} > 0$, для локальной области опасной для полета, параметр $A_{\text{attr}} < 0$. Величина параметра перед экспонентой в (3) варьируется в широком диапазоне $500 < A_{\text{attr}} < 3000$ Дж.

Уравнения динамики аппарата α в виртуальном пространстве имеют вид

$$\frac{dV^{(\alpha)}}{dt} = \frac{1}{\tau^{(\alpha)}} \left(V_{\text{rnd}}^{(\alpha)} + G^{(\alpha)} - V^{(\alpha)} \right) - \frac{1}{m^{(\alpha)}} \frac{\partial U_{\text{eff}}^{(\alpha)}(\Delta r)}{\partial \Delta r} \frac{\partial \Delta r}{\partial r} \Big|_{r=R^{(\alpha)}}, \quad V^{(\alpha)}|_{t=0} = V_0^{(\alpha)}, \quad (4)$$

$$\frac{dR^{(\alpha)}}{dt} = V^{(\alpha)}, \quad R^{(\alpha)}|_{t=0} = R_0^{(\alpha)}, \quad (5)$$

Здесь $V^{(\alpha)}$ реальная скорость аппарата; $G^{(\alpha)}$ — скорость детерминированного дрейфа аппарата к цели; $m^{(\alpha)}$ — масса аппарата; $U_{\text{eff}}^{(\alpha)}$ — эффективный потенциал (2); $\tau^{(\alpha)}$ — время релаксации скорости аппарата к желаемой скорости движения; $V_{\text{rnd}}^{(\alpha)}$ — случайная компонента скорости аппарата.

Наличие случайной компоненты скорости приводит к коррелированному характеру движения динамической системы в потенциальном силовом поле [16, 17]. Случайная компонента скорости в (4) является решением (СОДУ)

$$\frac{dV_{\text{rnd}}^{(\alpha)}(t)}{dt} = \frac{1}{T^{(\alpha)}} \left[\mathcal{E}^{(\alpha)}(t) - V_{\text{rnd}}^{(\alpha)}(t) \right]. \quad (6)$$

Здесь $\mathcal{E}^{(\alpha)}(t)$ — дельта-коррелированный во времени случайный процесс Гаусса с нулевым средним значением и заданной дисперсией; $T^{(\alpha)}$ — интегральный временной масштаб флуктуаций случайной скорости аппарата.

Управление группой БПЛА в физическом пространстве осуществляется следующим образом. С каждого аппарата на компьютер оператора поступает информация о скорости $V^{(\alpha)}$ и координате $R^{(\alpha)}$ его движения. После временного шага интегрирования на контроллеры аппаратов передаются управляющие сигналы — левые части системы уравнений динамики (4). Система уравнений (1)–(6) интегрируется численно современными модифицированными алгоритмами решения СОДУ типа Рунге – Кутта [18].

Результаты моделирования. Результаты модельных расчетов представляют траектории БПЛА для сужающихся или расширяющихся каналов кругового сечения. В конце полета аппараты должны сосредоточиться на оси канала. Параметры группы выбираются случайным образом из заданного интервала. Время релаксации и масса аппаратов $\tau^{(\alpha)} \in [1,3]$ с, $m^{(\alpha)} \in [7,10]$ кг; детерминированная скорость дрейфа к цели $|G^{(\alpha)}| \in [30,40] \frac{\text{км}}{\text{ч}}$; интегральный временной масштаб $T^{(\alpha)} \in [10,15]$ с; среднеквадратичная случайная скорость аппаратов $\left\langle V_{\text{rnd}}^{(\alpha)2} \right\rangle^{\frac{1}{2}} = [10,15] \text{ км/ч}$.

На рис. 2, б опасная зона не показана. На рис. 2 представлены траектории беспилотных аппаратов в транспортных коридорах в случае обхода зоны опасной для полета (рис. 2, а–б). Видно, что аппараты самосогласованным образом выбирают траектории обхода этой зоны. В детерминированном случае для обхо-

да локальных областей требуется сложный алгоритм с большим числом условных операторов. Нелокальный притягивающий потенциал и случайное поведение БПЛА способствует увеличению концентрации аппаратов в локальной области (рис. 2, в-г) и долгому их присутствию. Отметим, что все представленные сценарии транспорта группы реализуются без участия оператора.

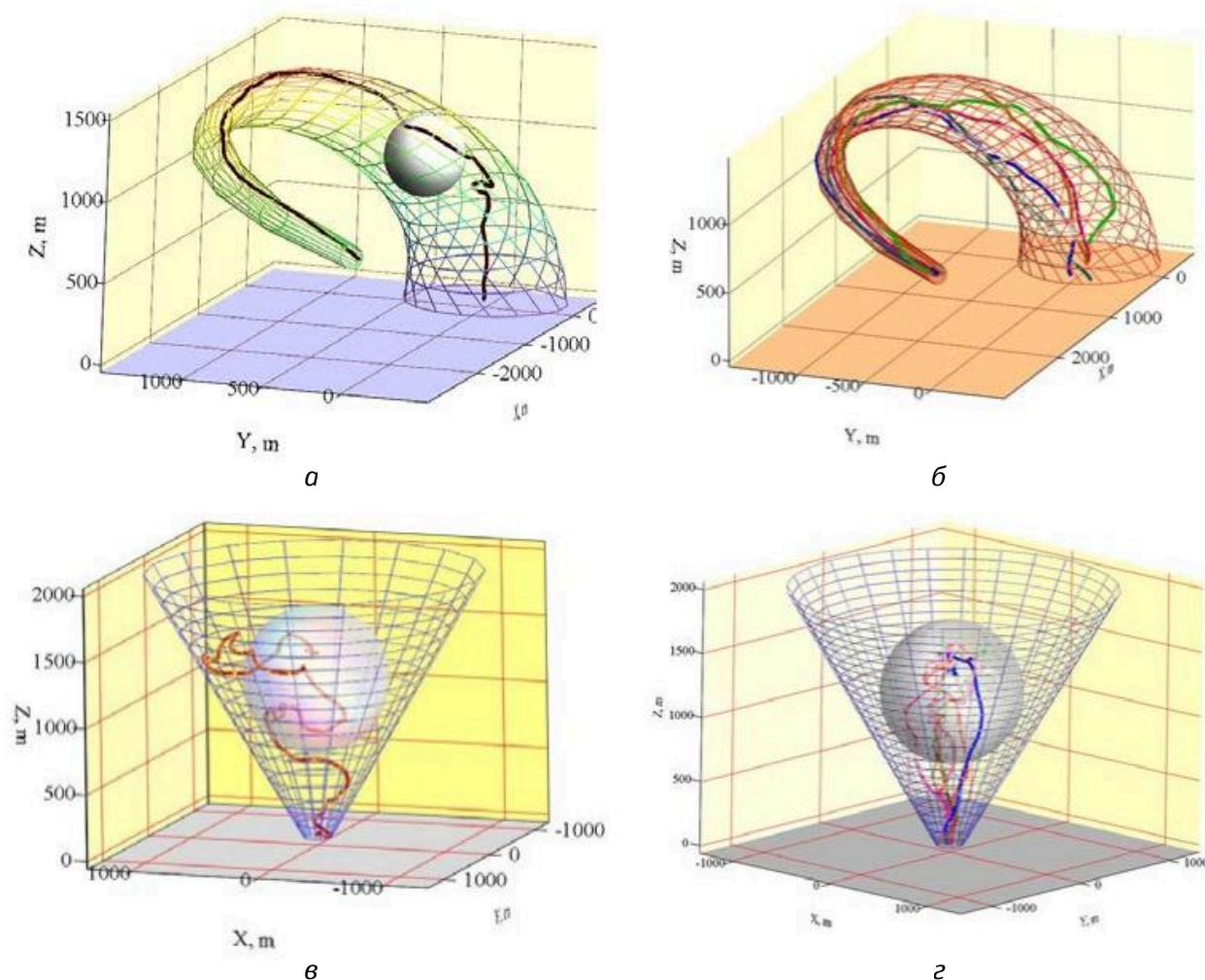


Рис. 2. Траектории одиночного БПЛА (а, в) и группы БПЛА в каналах транспортировки (показано сеткой) при наличии зон опасной для полета (а, б) и притягательной (в, г) (показаны сферами)

Закключение. Представлена модель управления группой БПЛА в автономном режиме с компьютера одного оператора. Сигналы управления поступают на контроллеры аппаратов в результате численного решения системы СОДУ, моделирующей в виртуальном нелокальном потенциале динамику группы БПЛА. Нелокальный силовой потенциал препятствует столкновению аппаратов друг с другом, удерживает аппараты в заданном транспортном коридоре и обеспечивает обтекание опасных для полета зон или сосредоточение аппаратов в повышенную локальную концентрацию БПЛА в заданных областях. Представлены результаты модельных расчетов траекторий полета для различных типов транспортных каналов.

Список источников

- [1] Rovira-Sugranes A., Razi A., Afghah F. et al. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: Trends, challenges, and future outlook. *Ad Hoc Networks*, 2022, vol. 130, art. no. 102790. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102790>
- [2] Васильченко А.С., Иванов М.С., Колмыков Г.Н. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления. *Системы управления, связи и безопасности*, 2019, № 4, с. 403–420. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10416>
- [3] 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>
- [4] Макаренко С.И. *Противодействие беспилотным летательным аппаратам*. Санкт-Петербург, Научные технологии, 2020, 204 с.
- [5] Моисеев В.С. *Групповое применение беспилотных летательных аппаратов*. Казань, Редакционно-издательский центр «Школа», 2017, 571 с.
- [6] Tao Y., Gao H., Ren F. et al. 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>
- [7] Hu Y., Yang S. X. A knowledge based genetic algorithm for path planning of a mobile robot. *Proceedings of the 2004 IEEE international Conference on Robotics & Automation New Orleans*, 2004, art. no. 4350. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302402>
- [8] Tao Y., Gao H., Ren F., et al. Mobile Service Robot Global Path Planning Method Based on Ant Colony. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, art. no. 3605. <https://doi.org/10.3390/app11083605>
- [9] Чжу Ю. Формирование управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма многоагентной модели роения. *Информатика, телекоммуникации и управление*, 2022, т. 15, № 4, с. 22–36. <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15402>
- [10] Shin Y., Kim E. Hybrid path planning using positioning risk and artificial potential fields. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2021, vol. 112, art. no. 106640. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106640>
- [11] Reina A., Valentini G., Fernández-Oto C. et al. A design pattern for decentralized decision making. *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, art. no. e0140950. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140950>
- [12] Wu Z., Dai J., Jiang B. et al. Robot path planning based on artificial potential field with deterministic annealing. *ISA Transactions*, 2023, vol. 138, pp. 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.02.018>
- [13] Meng R., Cheng X., Wu Z. et al. Improved ant colony optimization for safe path planning of AUV. *Helion*, 2024, vol. 10, no. 7, art. no. e27753. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27753>
- [14] Park M.G., Lee M.C. A new technique to escape local minimum in artificial potential field-based path planning. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2003, vol. 17, pp. 1876–1885. <https://doi.org/10.1007/BF02982426>
- [15] 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>
- [16] Yates C.A., Erban R., Escudero C. et al. Inherent noise can facilitate coherence in collective swarm motion. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2009 vol. 106, no. 14, pp. 5464–5469. <https://doi.org/10.1073/pnas.0811195106>
- [17] Derevich I.V., Klochkov A.K. Modeling the Motion of Particles in the Potential Force Field with Allowance for the Random Velocity Fluctuations of a Medium. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2022, vol. 95, pp. 1089–1100. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02573-0>
- [18] Debrabant K., Rößler A. Classification of stochastic Runge–Kutta methods for the weak approximation of stochastic differential equations. *Mathematics & Computers in Simul.*, 2008, vol. 77, no. 4, pp. 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2007.04.016>