

01 Синхронизация и управление движением ансамбля мобильных агентов

© Е.М. Варварин, Г.В. Осипов

Научно-образовательный математический центр „Математика технологий будущего“ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
E-mail: varvarin@unn.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2023 г.
В окончательной редакции 24 марта 2024 г.
Принято к публикации 27 марта 2024 г.

Предлагаются способы реализации последовательного, параллельного и имеющего вид заданной конфигурации движения ансамбля (роя) мобильных агентов с использованием эффекта хаотической фазовой синхронизации. Показана возможность управления движением ансамбля.

Ключевые слова: мобильный агент, синхронизация, управление движением ансамбля, осциллятор Рёсслера.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.13.58167.19836

Использование ансамбля мобильных агентов для изучения и анализа коллективной динамики в последние годы широко применяется в различных областях науки и техники [1,2]. Главным объектом большинства исследований в области коллективной динамики является синхронизация [3], которая сильно зависит от топологии связей ансамбля [4]. Можно выделить три основных типа связей в ансамблях: локальная (связь с ближайшими соседями), нелокальная (связь не только с ближайшими соседями), глобальная (связь по принципу „каждый с каждым“ [5]). Чаще всего такие связи в изучаемых математических моделях имеют стационарный характер, т.е. топология и сила связей не меняются во времени. Однако в реальном мире топология большинства структур не является постоянной, связи между элементами могут появляться и исчезать, усиливаться или ослабевать [6]. Системы, в которых помимо силы связи может изменяться и положение узлов, удобно рассматривать как ансамбли мобильных агентов [7]. Таким образом удалось рассмотреть, например, синхронизацию мобильных роботов [8], локализацию объектов распределенной следящей системой [9]. В работе [10] представлены результаты управления поведением ансамбля мобильных агентов на плоскости, рассмотрены некоторые конфигурации движения (последовательное и параллельное движение мобильных агентов на плоскости).

В качестве мобильного агента рассмотрим точку, движущуюся в трехмерном пространстве (x, y, z) так, что ее траектория полностью совпадает с траекторией соответствующего ей хаотического осциллятора. В качестве кандидата для генерирования хаотической траектории может быть взята любая динамическая система, способная генерировать хаотические колебания, например системы Лоренца [10], Рёсслера [10], Чуа и др. В настоящей работе, не теряя общности, рассмотрим

осциллятор Рёсслера

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -w_i y_i - z_i, \\ \dot{y}_i = w_i x_i + a_i y_i, \\ \dot{z}_i = b_i + z_i(x_i - c_i), \end{cases} \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где a_i, b_i, c_i — положительные параметры. В последующих экспериментах примем $a_i = 0.22, b_i = 0.1, c_i = 8.5$, параметр, характеризующий временные масштабы осцилляций, $w_i \in [0.93, 1.07]$. Параметры системы выбраны так, чтобы при достаточно близких к нулю начальных условиях (в настоящей работе рассматривался куб с длиной ребра 10 с центром в начале координат) фазовые траектории не уходили на бесконечность, а притягивались к хаотическому квазиаттрактору (см, например, [11]). Формально моделирование и указанный бифуркационный сценарий дают только хаотическое множество.

Организацию управления движением ансамбля мобильных агентов в пространстве можно разбить на два этапа: установление определенной конфигурации агентов и выведение агентов на заданную траекторию движения.

Для решения поставленных задач мы используем методы хаотической фазовой синхронизации (для задания ансамблю агентов определенной конфигурации их расположения в трехмерном пространстве) и вынужденной синхронизации (для обеспечения достижения заданного закона движения в пространстве). Под хаотической фазовой синхронизацией понимается процесс установления при достаточно сильной связи между взаимодействующими хаотическими осцилляторами одинаковой усредненной частоты колебаний и ограниченной по модулю разности фаз (фазового сдвига) хаотических колебаний [12].

Целью нашего исследования является создание такого ансамбля агентов, в котором взаимодействия агентов с

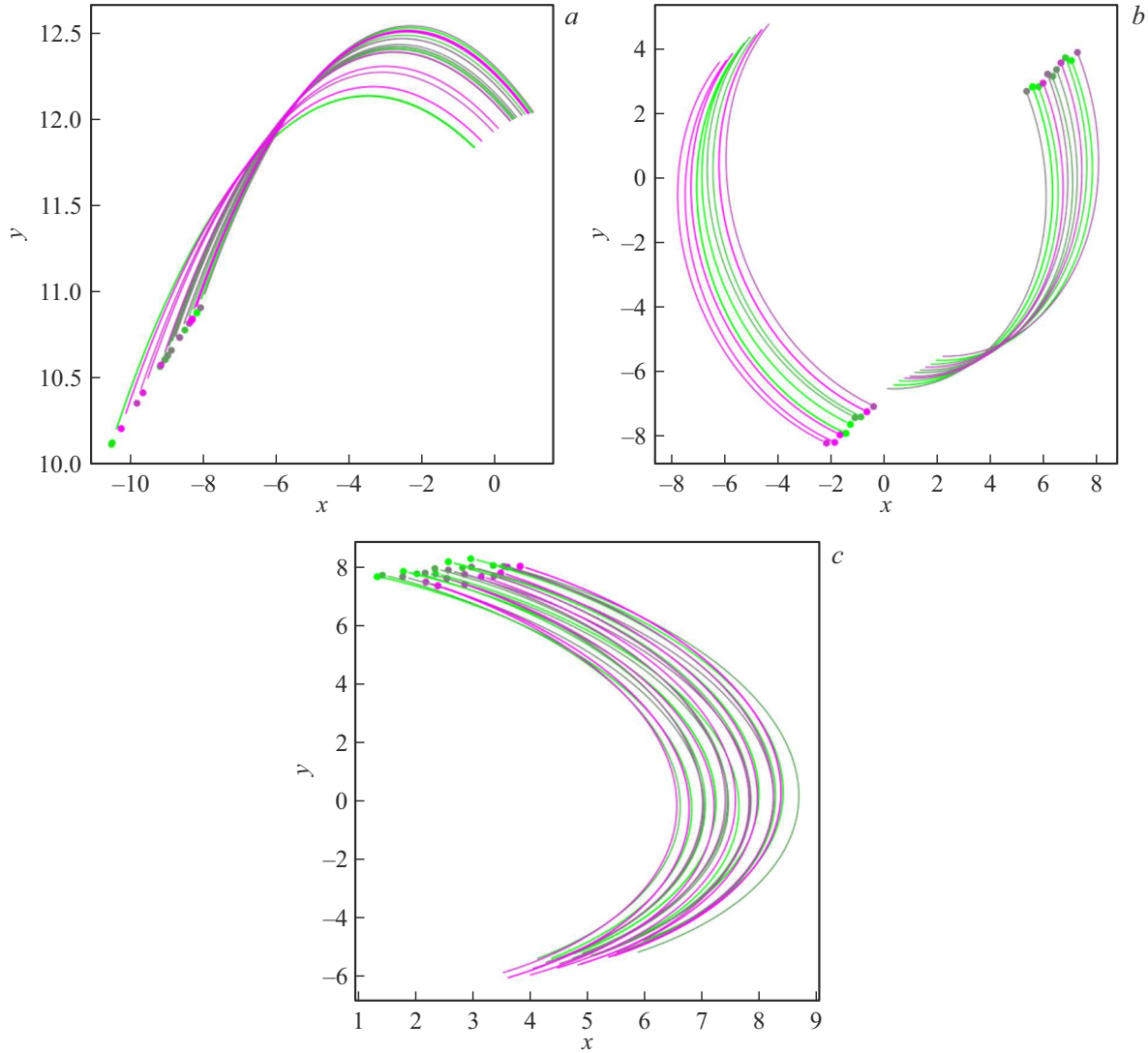


Рис. 1. Синхронизация ансамбля мобильных агентов. *a* — полная синхронизация при реализации последовательного движения, *b* — кластерная синхронизация роя при параллельном движении (в дальнейшем два кластера объединятся в один), *c* — придание рюю структуры квадрата 5×5 элементов.

соседями начинают только при их достаточной (наперед заданной) близости, поэтому при любой конфигурации связь между i -м и j -м агентами будет удовлетворять условию

$$d = \begin{cases} d' & \text{при } (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 < r^2, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

где $d' = \text{const}$ — параметр связи. В нашем исследовании примем $d' = 0.2$, $r = 4$, т.е. агенты начинают взаимодействовать при попадании в шар радиуса r .

1. Последовательное движение агентов

Добавим в систему (1) „притягивающую“ связь по координате y следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -w_i y_i - z_i, \\ \dot{y}_i = w_i x_i + a_i y_i + \sum_j d(y_j - y_i), & i = \overline{1, N}, \\ \dot{z}_i = b_i + z_i(x_i - c_i). \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия всех осцилляторов разные. С течением времени в силу хаотичности движений изображающие точки рано или поздно сближаются на расстояние меньше r . Между агентами возникает взаимодействие и, если связь достаточно сильная, агенты синхронизируются. Далее все большее число агентов сближается на расстояние r и синхронизируется. Образуются кластеры синхронизированных агентов. Фазовые траектории при этом близки, но имеет место фазовый сдвиг. В итоге достигается глобальная хаотическая фазовая синхронизация, в результате которой агенты двигаются друг за другом „по цепочке“. Результат численных экспериментов (глобальная синхронизация агентов) представлен на рис. 1, *a*.

2. Параллельное движение агентов

Кроме последовательного движения агентов удастся реализовать их параллельное движение — движение в

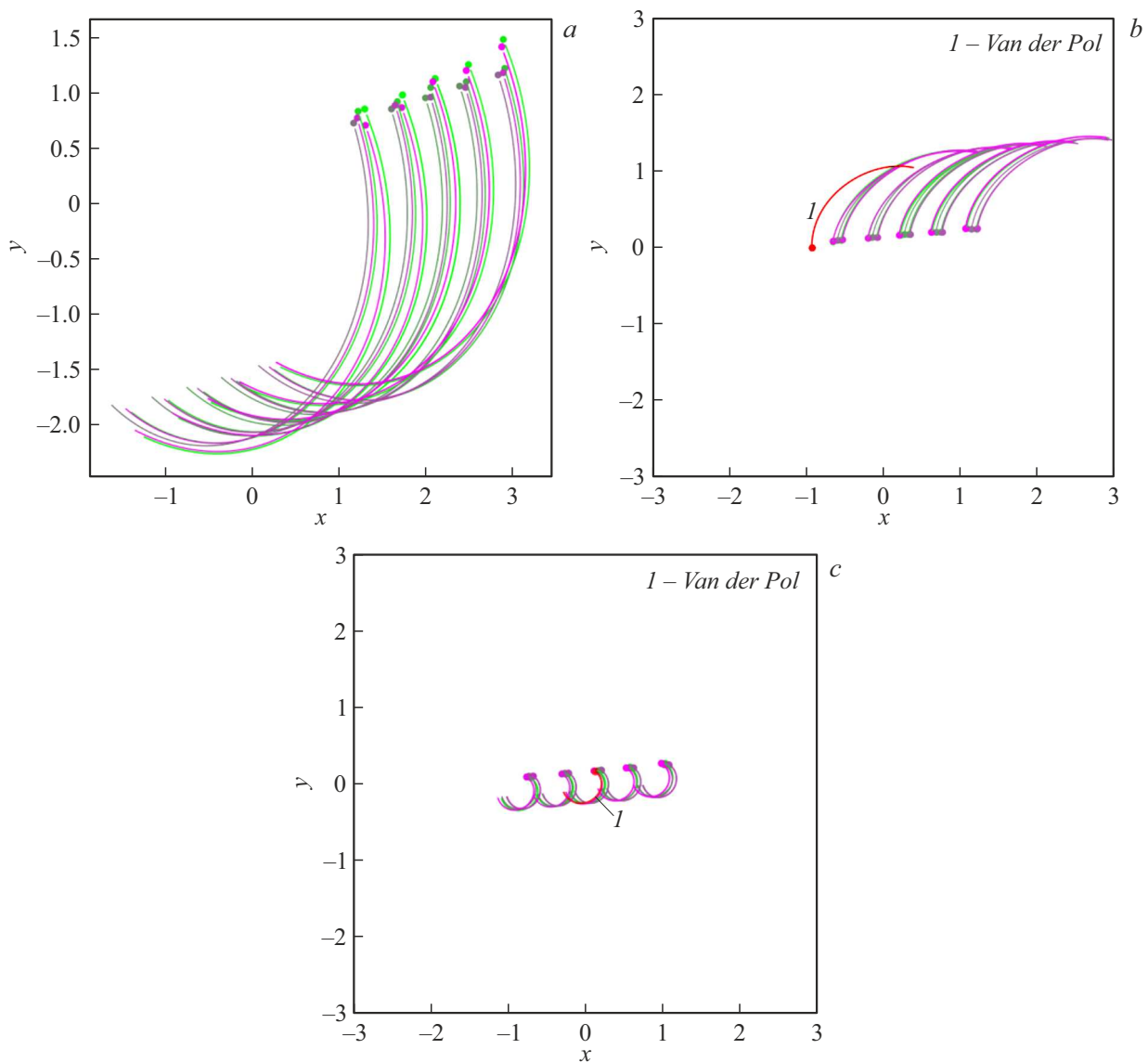


Рис. 2. Захват ансамбля агентом, заданным уравнением Ван дер Поля. *a* — состояние роя до добавления нового агента, *b* — новый элемент начал притягивать всех агентов, *c* — рой движется по траектории фокуса к состоянию равновесия агента, заданного уравнением Ван дер Поля. Значение параметра $\mu = -0.2$.

виде „единого строя“. Параллельное движение достигается с помощью добавления „отталкивающей“ связи по координате x

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -w_i y_i - z_i + \sum_j d(x_j - x_i) + \sum_j \frac{d}{x_i - x_j}, \\ \dot{y}_i = w_i x_i + a_i y_i + \sum_j d(y_j - y_i), \quad i = \overline{1, N}, \\ \dot{z}_i = b_i + z_i(x_i - c_i). \end{cases} \quad (4)$$

Аналогично случаю последовательного движения с течением времени образуются пары, тройки и т.д. параллельно двигающихся агентов. В отличие от последовательного движения при сближении i -го и j -го агентов введенная описанным выше способом связь приводит к появлению противоположно направленных сил взаимодействия, что заставляет агентов находиться на

определенном перпендикулярном движении расстоянию, т.е. за счет „отталкивающей“ связи агенты начинают двигаться одним рядом, параллельно друг другу. Поведение элементов при данной связи иллюстрирует рис. 1, *b*.

3. Придание рою мобильных агентов структуры различных геометрических форм

В этом случае мы используем определенные комбинации связей последовательного и параллельного движения для получения структур различной геометрической формы (прямоугольник, круг, треугольник и др.) Не теряя общности, рассмотрим конфигурацию типа „прямоугольник“.

Для организации подобного движения введем параметры k_{str} и k_{col} — число элементов в одной строке и одном столбце соответственно. Тогда для каждой

отдельной строки нам нужно добавить „отталкивающую“ связь. В то же время нам нужно связать строку с соседними строками „притягивающей“ связью:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -w_i y_i - z_i + \sum_{j=s(i)}^{s(i)+k_{str}-1} \left[d(x_j - x_i) + \frac{d}{x_i - x_j} \right] = f_{grid}, \\ \dot{y}_i = w_i x_i + a_i y_i + \sum_{j=\max(0, s(i)-k_{str})}^{\min(N, s(i)+2k_{str}-1)} d(y_j - y_i) = g_{grid}, \\ \dot{z}_i = b_i + z_i(x_i - c_i) = h_{grid}, \end{cases} \quad (5)$$

где $i = \overline{1, N}$; $k_{str} k_{col} = N$; $s(i) = i - i \bmod(k_{str}) + 1$ — первый элемент текущей строки для элемента i ; $i \bmod(k_{str})$ — остаток от деления i на k_{str} .

С течением времени за счет синхронизации агенты, связанные как „притягивающей“, так и „отталкивающей“ связями, начинают формировать группы последовательно и параллельно двигающихся агентов, синхронизируются в группы. Далее происходит объединение агентов в единый кластер в виде структуры, приведенной на рис. 1, с.

Теперь рассмотрим задачу деактивации всех агентов — перемещение их в заданную точку пространства. Для этого помимо агентов, заданных системой (1), вводится еще один агент, который движется по заданной траектории. В качестве такого агента возьмем осциллятор Ван дер Поля

$$\begin{cases} \dot{X} = -Y, \\ \dot{Y} = WX + \mu(1 - X^2)Y, \end{cases} \quad (6)$$

где μ — отрицательный параметр, $W = 1$. При заданном наборе параметров система (6) имеет единственный аттрактор — устойчивое состояние равновесия в точке $(0,0)$. Именно в эту точку должен прийти весь ансамбль. Чем больше (по модулю) μ , тем быстрее ансамбль попадает в заданную точку. Очевидно, что управляющая траектория может быть любой. Это может быть заданное регулярное или хаотическое движение.

Для остальных агентов возьмем уравнение (5) и добавим всем элементам связь с уравнением Ван дер Поля следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_{grid}, \\ \dot{y}_i = g_{grid} + D(Y - y_i), \quad i = \overline{1, N}, \\ \dot{z}_i = h_{grid}, \end{cases} \quad (7)$$

где связь D работает аналогично связи d , но при сближении мобильного агента с агентом, движущимся согласно уравнению Ван дер Поля. В результате все агенты приходят в окрестность состояния равновесия $(0,0)$ (рис. 2).

В результате исследования синхронизации и управления коллективной динамикой роя мобильных хаотических агентов — осциллятора Рёсслера — оказалось возможным получить заданные типы движений мобильных агентов в трехмерном пространстве: последовательное

(один за другим на определенном расстоянии, которым можно управлять), параллельное („единым фронтом“) и движение в виде заданных геометрических структур. Все предложенные способы структурообразования роя мобильных агентов можно рассматривать как процессы самоорганизации. Продемонстрировано, что при помощи „внешнего“ агента можно задать требуемую траекторию движения роя. Например, „посадить“ рой в заданной точке.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-12-00180 (задача синхронизации) и проекта № 0729-2020-0036 Министерства науки и высшего образования РФ (задача управления).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.L.S. Freitas, S. Yanchuk, M. Zaks, E.E.N. Macau, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, **94**, 105543 (2021). DOI: 10.1016/j.cnsns.2020.105543
- [2] A. Barciš, C. Bettstetter, *IEEE Access*, **8**, 218752 (2020). DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3041393
- [3] T. Weng, X. Chen, Z. Ren, J. Xu, *Physica A*, **614**, 128562 (2023). DOI: 10.1016/j.physa.2023.128562
- [4] L. Chen, Q. Yang, C. Li, G. Ma, *Int. J. Control Autom. Syst.*, **19**, 1740 (2021). DOI: 10.1007/s12555-020-0274-3
- [5] V.L.S. Freitas, S. Yanchuk, H.L.C. Grande, E.E.N. Macau, *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, **230**, 2857 (2021). DOI: 10.1140/epjs/s11734-021-00153-6
- [6] C. Hu, H. He, H. Jiang, *IEEE Trans. Autom. Control*, **67**, 2597 (2021). DOI: 10.1109/TAC.2021.3088805
- [7] S. Majhi, D. Ghosh, J. Kurths, *Phys. Rev. E*, **99**, 012308 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevE.99.012308
- [8] F. Zhang, W. Chen, Y. Xi, in *2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on intelligent robots and systems* (IEEE, 2006), p. 5570–5575. DOI: 10.1109/IROS.2006.282274
- [9] L. Dou, C. Song, X. Wang, L. Liu, G. Feng, *Automatica*, **118**, 109022 (2020). DOI: 10.1016/j.automatica.2020.109022.
- [10] В.А. Левин, Г.В. Осипов, *Письма в ЖТФ*, **42** (6), 42 (2016). [V.A. Levin, G.V. Osipov, *Tech. Phys. Lett.*, **42**, 298 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016030251].
- [11] N. Stankevich, *Nonlinear Dyn.*, **112**, 2949 (2024). DOI: 10.1007/s11071-023-09183-2
- [12] S. Boccaletti, J. Kurths, G. Osipov, *Phys. Rep.*, **366**, 1 (2002). DOI: 10.1016/S0370-1573(02)00137-0