

01

Управление движением группы мобильных роботов

© В.А. Левин, Г.В. Осипов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: vadimlevin1@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 октября 2015 г.

Предлагается способ управления ансамблем мобильных агентов с изменяющейся топологией связей, основанный на принципах фазовой синхронизации регулярных и хаотических осцилляторов. Приводятся результаты моделирования управления для последовательного, параллельного и строго заданного движения мобильных агентов.

В последние годы управление сетями автономных мобильных агентов привлекает все больше внимания со стороны ученых и инженеров. Это связано с тем, что подход в изучении статических и динамических структур с помощью сети мобильных агентов находит применение в биологии [1–5], медицине [6], социальном взаимодействии [7,8] и в других областях. Исследование механизмов самоорганизации и коллективного движения групп в природе (например, полет стаи птиц [4]) позволит упростить коллективное управление несколькими роботами [9–11] или транспортными средствами [12], используемыми человеком. В большинстве случаев структура групп, наблюдаемых в жизни, случайна и изменяется с течением времени (например, нейронные ансамбли [13], мобильные системы [14]). Поэтому все больше исследований проводится в области сетей с изменяющейся топологией [15–18]. Данная работа посвящена организации управления коллективами мобильных агентов с изменяющимися во времени связями между ними.

Под мобильным агентом будем понимать материальную точку, движущуюся в плоскости (x,y) таким образом, что ее траектория совпадает с проекцией траектории некоторого закрепленного за данным агентом хаотического осциллятора на плоскость (x,y) . Все приведенные результаты легко распространяются на случай движения в трехмерном

пространстве. В данной работе в качестве хаотического осциллятора, не теряя общности, будем рассматривать осциллятор Ресслера:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -\omega_i y_i - z_i = f_i(y, z, \omega), \\ \dot{y}_i = \omega_i x_i + a y_i = g_i(x, y, \omega, a), i = \overline{1, N}, \\ \dot{z}_i = b + z_i(x_i - c) = h_i(x, z, b, c), \end{cases} \quad (1)$$

где a, b, c, ω — положительные параметры. В работе рассмотрены следующие значения параметров: $a = 22, b = 0.1, c = 8.5$. Параметры ω_i равномерно распределены на некотором отрезке.

Организацию управления агентами в пространстве можно разбить на два этапа: установление заданной конфигурации агентов, в данном случае — последовательной и параллельной, и выведение их на траекторию движения.

Для обеспечения заданной конфигурации структуры ансамбля мобильных агентов воспользуемся теорией хаотической фазовой синхронизации. Кроме достижения синхронного поведения агентов это даст нам возможность задавать управление не для каждого агента в отдельности, а общее для группы в целом. Использование хаотических осцилляторов в качестве определяющих движение агентов позволяет не заботиться об области синхронизации в плоскости (x, y) , потому что рано или поздно все агенты побывают в достаточно обширной области этой плоскости.

В зависимости от интересующей топологии связь будет вводиться по-разному, но ее сила между агентами и всегда будет удовлетворять следующему условию:

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

где $\tilde{d} = \text{const}$, r определяет величину области G , в которой агенты взаимодействуют. Введение подобной силы связи соответствует тому предположению, что топология системы изменяется во времени, а именно, агенты начинают действовать друг на друга только тогда, когда они приближаются на достаточно малое расстояние. В зависимости от длительности налаживания связей можно говорить об образовании одной или нескольких групп синхронизованных агентов, управлять

которыми можно отдельно. Предполагается, что связь \tilde{d} достаточна для достижения фазовой синхронизации.

Мы реализовали три задачи управления движением. Первые две основываются на применении взаимной хаотической синхронизации и служат для организации устойчивых структур, управление которыми будет продемонстрировано в задаче 3.

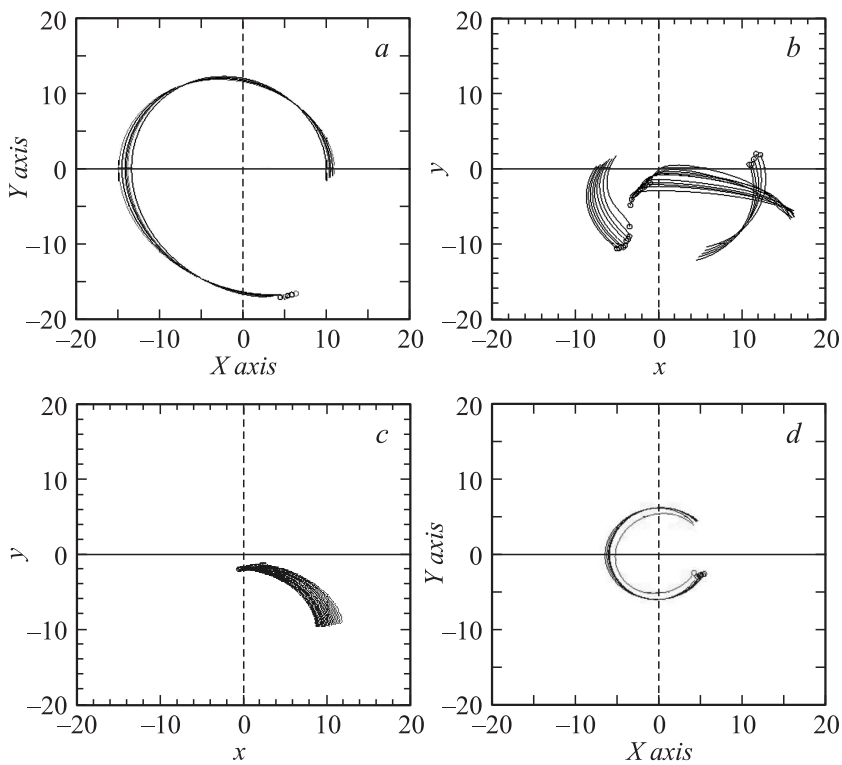
Задача 1. Последовательное движение цепочки агентов. Для организации подобного движения во второе уравнение системы (1) вводится связь

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(y, z, \omega), \\ \dot{y}_i = g_i(x, y, \omega, a) + \sum_j d(y_j - y_i), i = \overline{1, N}, \\ \dot{z}_i = h_i(x, z, b, c). \end{cases} \quad (3)$$

При фазовой синхронизации [19] наблюдается наличие определенного (ограниченного, но не фиксированного) фазового сдвига, который можно регулировать величиной связи. Наличие такого сдвига обеспечивает последовательное, одно за другим движение агентов без столкновений. Связь \tilde{d} при этом устанавливается достаточно сильной для достижения фазовой синхронизации. В связи с тем, что агенты попадают в область G одновременно, происходит последовательная во времени синхронизация агентов и тем самым последовательное увеличение мощности кластера (группы) организованно двигающихся агентов. Могут также образовываться многие кластеры взаимно синхронизованных агентов. Вариант одного, глобального кластера, в котором все агенты двигаются цепочкой друг за другом, продемонстрирован на рисунке, а. При фазовой синхронизации наблюдается наличие определенного (ограниченного, но не фиксированного) фазового сдвига, который можно регулировать величиной связи.

Задача 2. Параллельное движение цепочки агентов. В данном случае помимо введения связи для взаимной синхронизации, которая была использована в предыдущей задаче, вводится „отгалкивающая“ связь по координате x

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(y, z, \omega) + \sum_j d(x_j - x_i) + \sum_j \frac{d}{(x_i - x_j)}, \\ \dot{y}_i = g_i(x, y, \omega, a), \\ \dot{z}_i = h_i(x, z, b, c). \end{cases} \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$



Сила связи $\bar{d} = 0.2$ при радиусе $r = 3$, остальные параметры: $a_i = 0.22$, $b_i = 0.1$, $c_i = 8.5$, $\omega_i \in [0.93 \dots 1.07]$. *a* — последовательное движение агентов одной группой ($N = 8$); *b* — параллельное движение агентов в группах ($N = 25$); *c* — параллельное движение агентов одной группой ($N = 25$); *d* — организованное движение агентов по траектории предельного цикла системы Ван-дер-Поля ($N = 8$).

Таким образом, при сближении пары мобильных агентов предлагаемая связь обеспечит противоположно направленные силы, которые вынуждают агентов отталкиваться на определенное ограниченное расстояние. Поведение агентов при такой связи проиллюстрировано на рисунке *b* (кластерная синхронизация) и рисунке *c* (глобальная синхронизация).

Задача 3. Движение агентов по заданной траектории. Для решения этой задачи кроме агентов, заданных системой (1), вводится еще один агент, движущийся по заданной нами траектории. Этот агент является ведущим, а все остальные должны следовать за ним. Такое поведение можно наблюдать в природе (к примеру, вожак в стае). Связь в данном случае между ведущим и остальными агентами однонаправленная и имеет место вынужденная фазовая синхронизация. Ниже приводятся два примера вывода ансамбля агентов на заданные траектории.

Пример 1. Заданная траектория — предельный цикл в системе Ван-дер-Поля. Осциллятор Ван-дер-Поля запишем в виде

$$\begin{cases} \dot{X} = -Y, \\ \dot{Y} = X + \mu(1 - X^2)Y, \end{cases} \quad (5)$$

где μ — малый параметр.

Для остальных агентов динамические уравнения примут следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(y, z, \omega), \\ \dot{y}_i = g_i(x, y, \omega, a) + \sum_j d(y_j - y_i) + D(Y - y_i), i = \overline{1, N}, \\ \dot{z}_i = h_i(x, z, b, c), \end{cases} \quad (6)$$

где связь D включается аналогично со связью d , только при сближении мобильного агента с ведущим агентом, движущимся по заданной траектории.

В зависимости от того, какой режим реализуется в осцилляторе Ван-дер-Поля, можно либо привести всех агентов в статическое состояние, т.е. они перестанут двигаться (при этом во всех динамических системах установится состояние равновесия), либо вывести к траектории, близкой к предельному циклу (см. рисунок, d)

Пример 2. В качестве целевой траектории можно взять хаотическую траекторию в системе Лоренца

$$\begin{cases} \dot{X} = \sigma(Y - X), \\ \dot{Y} = X(r - Z) - Y, \\ \dot{Z} = XY - bZ. \end{cases} \quad (7)$$

Параметры системы (7) выбираются так, чтобы в ней реализовывался хаотический режим. Для подчинения управлению со стороны системы

Лоренца оказалось необходимым кроме связи по y -координатам добавить связь по x -координатам:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(y, z, \omega) + D(X - x_i), \\ \dot{y}_i = g_i(x, y, \omega, a) + \sum_j d(y_j - y_i) + D(Y - y_i), \quad i = \overline{1, N}, \\ \dot{z}_i = h_i(x, z, b, c). \end{cases} \quad (8)$$

В этом случае мобильный агент, соответствующий аттрактору Лоренца, постепенно начнет захватывать остальных мобильных агентов, при этом оставаясь на собственной траектории.

В результате исследования коллективного управления группой мобильных агентов на основе динамических уравнений хаотического осциллятора Рёсслера удалось заставить весь ансамбль двигаться одной или несколькими группами. Было показано, что добавление различных динамических связей как между агентами в ансамбле, так и с „внешним“ агентом позволит получить разные структуры, движущиеся по различным траекториям. Такой подход позволяет адаптивно управлять агентами в зависимости от внешних условий.

Работа была выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00811).

Список литературы

- [1] *Breder C.M.* // Ecology. 1954. P. 361–370.
- [2] *Okubo A.* // Adv. Biophys. 1986. V. 22. P. 1–94.
- [3] *Warburton K., Lazarus J.* // J. Biology. 1991. V. 150. N 4. P. 473–488.
- [4] *Toner J., Tu Y.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 23. P. 4326.
- [5] *Peng L. et al.* // Phys. Rev. E. 2009. V. 79. N 2. P. 026 113.
- [6] *Frasca M. et al.* // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. N 3. P. 036 110.
- [7] *Guan S.U., Wang T., Ong S.H.* // Future Generation Computer Systems. 2003. V. 19. N 2. P. 173–186.
- [8] *Kubo M., Sasakabe Y.* // Int. Scientific J. Methods Models Complexity. 2003. V. 6. N 1.
- [9] *Buscarino A. et al.* // Chaos: Interdisciplinary J. Nonlinear Science. 2006. V. 16. N 1. P. 015 116.
- [10] *Frasca M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. N 20. P. 204 102.
- [11] *Porfiri M., Roberson D.G., Stilwell D.J.* // Automatica. 2007. V. 43. N 8. P. 1318–1328.

- [12] *Fax J.A., Murray R.M.* // Automatic Control, IEEE Trans. 2004. V. 49. N 9. P. 1465–1476.
- [13] *Onnela J.P.* et al. // Proc. National Academy Sci. 2007. V. 104. N 18. P. 7332–7336.
- [14] *Valencia M.* et al. // Phys. Rev. E. 2008. V. 77. N 5. P. 050905.
- [15] *Belykh I.V., Belykh V.N., Hasler M.* // Phys. D: Nonlinear Phenomena. 2004. V. 195. N 1. P. 188–206.
- [16] *Wang L., Shi H., Sun Y.* // Phys. Rev. E. 2010. V. 82. N 4. P. 046222.
- [17] *Lü J., Chen G.* // Automatic Control, IEEE Trans. 2005. V. 50. N 6. P. 841–846.
- [18] *Wu X.* // Physica A: Statistical Mechanics Applications. 2008. V. 387. N 4. P. 997–1008.
- [19] *Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J.* Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. Cambridge university press, 2003. V. 12.