

01

Исследование особенностей переключения пространственно-временной активности в двумерной решетке модельных нейронов Розе—Хиндмарш

© Л.А. Сконженко, Л.В. Красичков

Саратовский государственный университет
E-mail: lvk@cas.ssu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 21 апреля 2008 г.

Исследуется пространственно-временная динамика в решетке модельных нейронов Розе—Хиндмарш с неоднородными связями. Предложена функция для оценки частоты спайковой и берстовой активности систем с двумя характерными временными масштабами колебаний. На основе предложенной функции проведен анализ влияния неоднородности связей на динамику решетки.

PACS: 05.45.Xt, 87.80.-y, 87.18.Sn, 89.75.Kd

Моделирование распределенных систем со сложной пространственно-временной динамикой представляет несомненный интерес для многих областей современного естествознания [1–5]. Особенно актуальными представляются задачи, связанные с изучением пространственно-временных состояний нелинейных активных сред в присутствии различных типов неоднородностей. В качестве последних могут служить всевозможные дефекты пространственной организации распределенной системы [6,7], неидентичность составляющих ее элементов, а в случае дискретной среды — неоднородность распределения связей. Построение модельных систем с неоднородными или изменяющимися связями представляется особенно важным в контексте изучения нейронных сетей и решеток элементов с нейроноподобной динамикой. Именно поэтому в основу моделирования была положена решетка модельных нейронов Розе—Хиндмарш [4,8,9].

В этом случае отдельный элемент решетки описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, а его динамика соот-

ветствует поведению уединенного биологического нейрона. Изменение переменной состояния имеет два характерных временных масштаба, сами колебания существенно нелинейны и могут изменяться от периодических до хаотических.

Известно, что в нейрофизиологических системах при воздействии одного элемента на другой частота следования импульсов имеет большее значение, нежели амплитудные эффекты [4]. Таким образом, информация, поступающая от одного парциального элемента к другому, либо просто интенсивность воздействия могут кодироваться частотой следования импульсов. С точки зрения моделирования это приводит к идее динамически изменяющихся связей, носящих пороговый характер и зависящих от состояния влияющих элементов. Отметим, что в большинстве работ по моделированию ансамблей нейроподобных элементов используются диффузионные связи. Основным эффектом при таких связях являются различные типы синхронизации между элементами ансамбля. Модели, построенные на основе диффузионных связей, не позволяют наблюдать эффекты, связанные с существенным изменением частоты генерации у отдельных элементов или групп элементов в ансамбле, и, как следствие, частота генерации не рассматривается в них как основной носитель информации о состоянии системы.

Отличительной чертой данной работы является нетривиальный способ организации связей между элементами, а также методика анализа пространственно-временной динамики решетки в этом случае.

В данной работе предложена функция для оценки частоты генерации спайковой и берстовой активности в решетке модельных нейронов — функция активности. *Функция активности* представляет собой одномерное отображение и имеет следующий вид:

$$\rho(t+h) = \alpha(\rho(t) + \beta h \Theta(x(t) - \gamma)), \quad (1)$$

где α, β, γ — параметры, h — шаг по времени, Θ — функция Хэвисайда, $\alpha < 1$ характеризует скорость убывания функции, $x(t)$ — переменная состояния нейроподобного элемента. Общее количество параметров функции активности формально можно свести к трем, однако введение шага h как четвертого параметра оправдано соображениями нормировки при численной реализации. Данная функция может быть успешно применена для описания частоты генерации спайков различных модельных нейроподобных элементов, например, систем ФитцХью–Нагумо

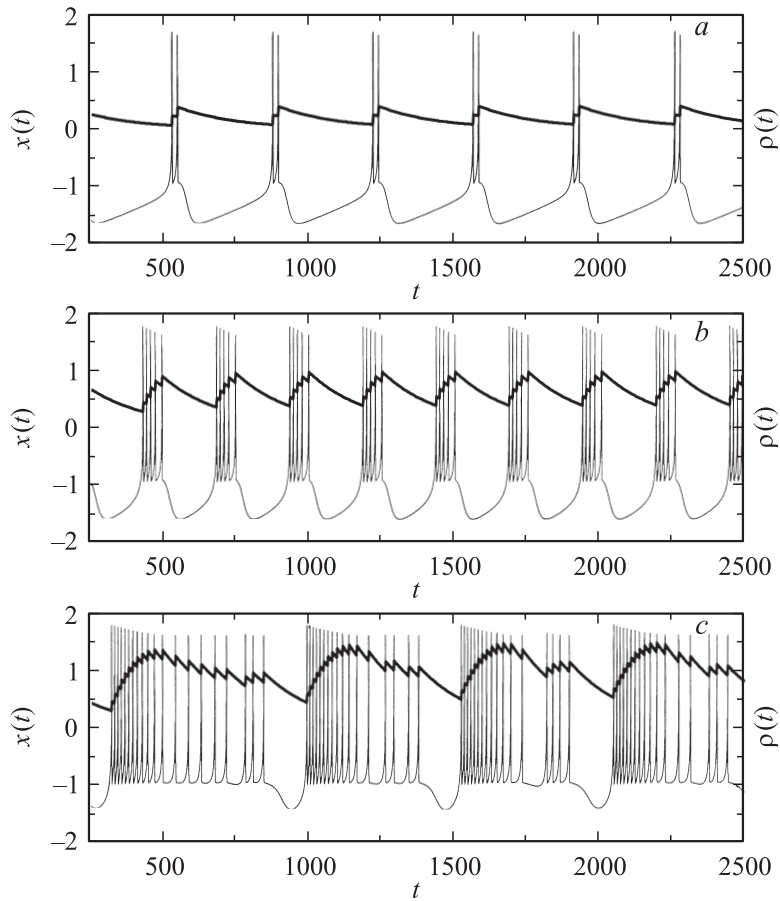


Рис. 1. Временные реализации переменной $x(t)$ изолированной системы Розе–Хиндмарш (тонкая линия) и функция для оценки частоты спайковой активности $\rho(t)$ (жирная линия) при $\alpha = 0.9999$, $\beta = 0.1$, $\gamma = 0.2$ для различных значений параметра I : $I = 1.3$ (a), $I = 2.0$ (b), $I = 3.281$ (c).

и Розе–Хиндмарш [8,10,11]. Характерный вид функции активности $\rho(t)$ для различных режимов колебаний системы Розе–Хиндмарш представлен на рис. 1.

В настоящей работе рассматривается вид связи, использующий функцию активности (1). При данном типе связи воздействие на заданный элемент со стороны соседнего имеет вид

$$F = \varepsilon \Theta(\rho - P), \quad (2)$$

где ε — параметр связи, ρ — функция активности элемента, P — порог воздействия. Если средняя частота генерации спайков, характеризующаяся величиной ρ , превышает порог P , то воздействие элемента на другой представляет собой некоторую постоянную добавку. С биологической точки зрения величину ε можно интерпретировать как проводимость мембраны: большему значению данной величины соответствует большее количество открытых ионных каналов и более высокая частота генерации спайков, и, наоборот, отрицательная величина этой постоянной добавки имеет смысл тормозящего воздействия. Это означает, что величина ε может быть по модулю больше единицы. Если элемент находится в состоянии повышенной активности ($\rho > P$), то, воздействуя на другой элемент, он открывает у него ε ионных каналов, если величина ε положительна (возбуждающая связь), и закрывает ε каналов, если ε отрицательна (тормозящая связь).

Особенностью связи, задаваемой посредством (2), является отсутствие синхронизации по переменной состояния, изменяется лишь средняя частота генерации спайков в связанных системах.

При построении решетки модельных нейронов использовалась связь между ближайшими соседями, рассматривалась решетка 100 на 100 элементов с периодическими граничными условиями.

Уравнения для решетки элементов Розе–Хиндмарш с пороговой связью (2) при использовании функции активности (1) имеют вид

$$\begin{cases} \frac{dx_{i,j}}{dt} = y_{i,j} + ax_{i,j}^2 - bx_{i,j}^3 - z_{i,j} + I + F_{i,j}, \\ \frac{dy_{i,j}}{dt} = c - dx_{i,j}^2 - y_{i,j}, \\ \frac{dz_{i,j}}{dt} = r[s(x_{i,j} - e) - z_{i,j}], \\ F_{i,j} = \varepsilon_{i+1,j} \Theta(\rho_{i+1,j} - P) + \varepsilon_{i-1,j} \Theta(\rho_{i-1,j} - P) + \\ \quad + \varepsilon_{i,j+1} \Theta(\rho_{i,j+1} - P) + \varepsilon_{i,j-1} \Theta(\rho_{i,j-1} - P), \end{cases} \quad (3)$$

где $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ — переменные состояния элемента решетки; a , b , c , d , e , r , s , I — параметры ($a = 3$; $b = 1$; $I = 3.281$; $c = 1$; $d = 5$;

$r = 0.0021$; $s = 4$; $e = -1.6$). При указанных значениях параметров изолированный элемент Розе–Хиндмарш ($F_{i,j} = 0$) демонстрирует хаотические колебания.

В случае, если связи между элементами во всей решетке (3) одинаковые и $\varepsilon > 0$, то распределение функции активности будет практически равномерным, так как все элементы будут генерировать спайки в среднем с одинаковой частотой (порог связи $P = 1$ полагается одинаковым для всех элементов решетки). Если изображать значение функции активности оттенками серого, то данной ситуации будет соответствовать равномерный фон, оттенок которого зависит от величин связей между элементами. Большему значению величины параметра связи соответствует более светлый оттенок.

В случае, когда в решетке присутствует область, в которой связи между элементами больше, чем в остальных частях решетки, данную неоднородность можно будет наблюдать на распределении функции активности ρ . В областях, где параметр связи принимает большее по сравнению с остальными областями значение, элементы будут генерировать спайки с большей частотой и им будут соответствовать большие значения функции активности ρ . На распределении функции активности области с большими значениями параметра связи будут отображаться более светлым оттенком серого.

Поскольку в реальных нейронных ансамблях в результате взаимодействий могут изменяться не только состояния элементов, но и конфигурация связей между ними [12], представляет интерес исследовать динамику решетки при переключении связей между элементами. До определенного момента времени ($t < 400$) существует фиксированное распределение значений параметров связи между элементами. В момент времени $t = 400$ происходит переключение распределения параметров связи на другое фиксированное распределение (рис. 2), что ведет к перераспределению частот генерации спайков у элементов при $t > 400$. На рис. 2 представлены распределения переменной состояния x и функции активности ρ для моментов времени до и после переключения конфигурации связей. Видно, что картина распределения функции активности позволяет выявить структуру связей в модельной решетке. Следует отметить, что при этом выявить области с различной частотой генерации спайков по пространственному распределению переменной состояния x не представляется возможным.

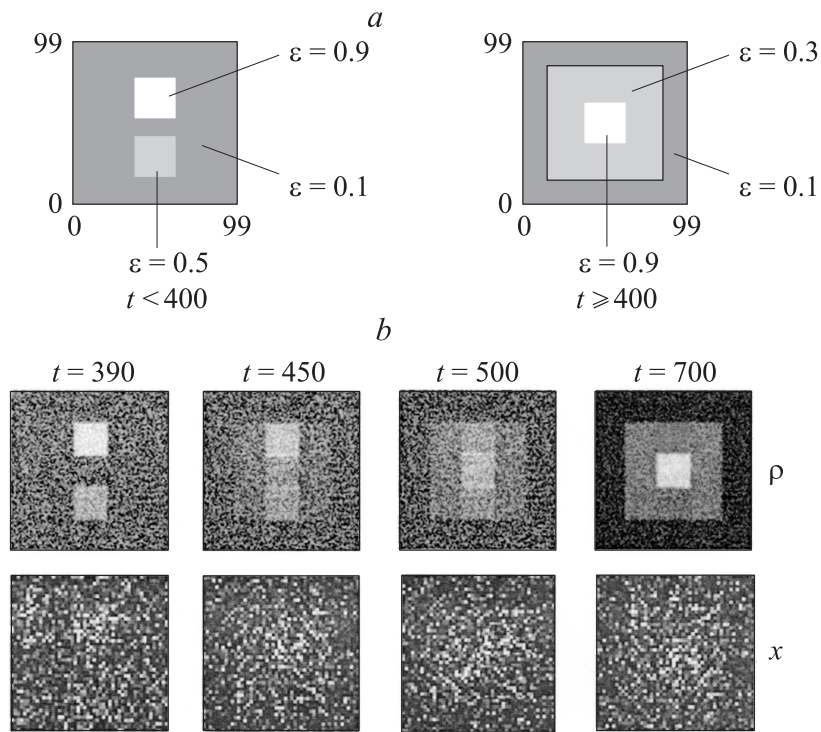


Рис. 2. Распределения параметров связи $\varepsilon_{i,j}$ в решетке (3) при $t < 400$ и $t > 400$ (a). Распределение переменной состояния $x_{i,j}$ и функции активности $\rho_{i,j}$ для фиксированных моментов времени (b).

Функция активности может быть успешно применена для описания ансамблей, в которых информация о состоянии парциальных элементов, а также структуре связей определяется частотой генерации импульсов элементами ансамбля. Для таких систем функция позволяет эффективно выявлять изменение распределения параметров связи по изменению частоты генерации колебаний элементов ансамбля, при этом отклик функции активности на изменение конфигурации связей происходит достаточно быстро — переходный процесс составляет 100–200 единиц условного времени.

Список литературы

- [1] Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990.
- [2] Рабинович М.И., Езерский А.Б. Динамическая теория формообразования. М.: Янус-К, 1998.
- [3] Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. 2-е изд. М.: Физматлит, 2005.
- [4] Абарбанель Г.Д.И., Рабинович М.И., Селверстон А., Баженов М.В., Хуэрта Р., Суццик М.М., Рубчинский Л.Л. // УФН. 1996. Т. 166. № 4. С. 363–390.
- [5] Яхно В.Г. // Нелинейные волны 2002. / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова, В.И. Некоркина. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.
- [6] Andreev K.V., Krasichkov L.V. // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2003. V. 6. N 4. P. 878–884.
- [7] Андреев К.В., Красичков Л.В. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 32. В. 31. С. 18.
- [8] Hindmarsh J.L., Rose R.M. // J. Proc. Roy. Soc. Lon. 1984. V. 221. P. 87.
- [9] Скобженко Л.А., Красичков Л.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 11. С. 71.
- [10] FitzHugh R. // Biophys. J. 1961. V. 1. P. 445.
- [11] Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. // Proc. IRE. 1962. V. 50. P. 2061.
- [12] Rabinovich M.I., Varona P., Selverston A.I., Abarbanel H.D.I. // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78. P. 1213–1265.