

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623436>

Эффект захвата фазы в модели спайковой нейронной сети с контекст-зависимой архитектурой связей

С.Ю. Маковкин^{1*}, И.А. Кастальский^{1, 2, 3}

¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация;

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация;

³ Самарский государственный медицинский университет, Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Изучение нелинейных процессов в системах мозга с позиций колебательно-волнового подхода в настоящее время является одним из актуальных направлений изучения механизмов генерации и обработки сигналов в мозге. Такие исследования могут помочь в реализации различных феноменов, таких как механизм ассоциативной памяти, на основе сетевых моделей биологически релевантных нейронов. В данной работе предложена архитектура нейронной сети для решения прикладных задач: фильтрации сигналов, обработки и распознавания информационных образов. С помощью реализованных механизмов по неполным фрагментам можно извлекать и полностью восстанавливать объекты из памяти. Каждый нейрон такой нейронной сети представляет собой биофизическую модель Ходжкина–Хаксли с модификацией Мэйнена, динамика которого наиболее правдоподобно воспроизводит процессы в нейронных клетках мозга.

При исследовании одиночных нейронов на них подавался постоянный внешний ток различной амплитуды. Были определены средние периоды автоколебаний, обнаружены значения параметров, соответствующие бифуркации Андронова–Хопфа. Обнаружено, что динамика нейрона Ходжкина–Хаксли–Мэйнена имеет гистерезис: при увеличении и уменьшении тока смещения устойчивый предельный цикл рождается и разрушается по разным сценариям. Устойчивый предельный цикл рождается через бифуркацию Андронова–Хопфа, а разрушается через седло-узловую бифуркацию на цикле.

Выявлены области параметров, соответствующие синхронизации двух нейронов при возбуждающей и тормозной синаптической связи. Все нейроны находились в автоколебательном режиме с наличием устойчивого предельного цикла в фазовом пространстве.

Построена трёхслойная нейронная сеть, состоящая из опорного нейрона, слоя сенсорных, слоя контрольных и слоя интернейронов. Связи контрольного и промежуточного слоя организованы по правилу Хебба.

Обнаружены области возбуждения для различных типов нейронов.

С помощью построенной нейронной сети проведены эксперименты по распознаванию бинарных информационных паттернов, кодируемых фазой сигнала. Образы в памяти кодировались с помощью распределения возбуждающих и тормозных синаптических связей. Динамически паттерны определяются синфазным или противофазным режимом захвата фазы (фазовой синхронизацией относительно глобального ритма). Перед попаданием на контрольный (выходной) слой нейронов сигналы суммируются на слое интернейронов с сигналом опорного нейрона, в результате чего фильтруется определённый информационный сегмент (синфазный или противофазный). После проведённой настройки параметров сеть правильно распознала паттерны.

Были найдены области фазовой синхронизации нейронов, используя которые, можно управлять режимами активности сети. Подтверждена возможность существования режимов захвата фазы и распознавания образов с помощью нейронов Ходжкина–Хаксли–Мэйнена.

Итого в результате выполнения проекта по моделированию спайковой нейронной сети:

- 1) рассчитаны двухпараметрические диаграммы регионов возбуждения нейронов в различных режимах;
- 2) использован эффект возбуждающей и тормозной связи в синаптических токах для представления входного сигнала;
- 3) перенесён абстрактный математический алгоритм расчёта матрицы Хебба в реализацию синаптических токов между слоями нейронов;
- 4) использован эффект фазовых кластеров для представления выходного паттерна;
- 5) использована реально существующая топология нейронов зрительно-мозгового отдела в качестве работающей модели сети Хопфилда на спайковой нейронной сети с правилом Хебба для задачи распознавания графических образов.

Ключевые слова: нейрон; синаптическая связь; правило Хебба.

Рукопись получена: 10.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

Как цитировать:

Маковкин С.Ю., Кастальский И.А. Эффект захвата фазы в модели спайковой нейронной сети с контекст-зависимой архитектурой связей // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 858–861. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623436>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *J Physiol.* 1952. Vol. 117, N 4. P. 500–544. doi: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764
2. Makovkin S.Y., Shkerin I.V., Gordleeva S.Y., Ivanchenko M.V. Astrocyte-induced intermittent synchronization of neurons in a minimal network // *Chaos, Solitons & Fractals.* 2020. Vol. 138. P. 109951. doi: 10.1016/j.chaos.2020.109951
3. Gordleeva S.Y., Ermolaeva A.V., Kastalskiy I.A., Kazantsev V.B. Astrocyte as spatiotemporal integrating detector of neuronal activity // *Front Physiol.* 2019. Vol. 10. P. 294. doi: 10.3389/fphys.2019.00294
4. Tsybina Y., Kastalskiy I., Krivososov M., et al. Astrocytes mediate analogous memory in a multi-layer neuron–astrocyte network // *Neural Comput & Applic.* 2022. V. 34. P. 9147–9160. doi: 10.1007/s00521-022-06936-9
5. Makovkin S., Kozinov E., Ivanchenko M., Gordleeva S. Controlling synchronization of gamma oscillations by astrocytic modulation in a model hippocampal neural network // *Sci Rep.* 2022. Vol. 12, N 1. P. 6970. doi: 10.1038/s41598-022-10649-3

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* С.Ю. Маковкин; адрес: Российская Федерация, 603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23; e-mail: makovkin@neuro.nnov.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623436>

Phase-locked states in a spiking neural network model with a context-dependent connectivity

S.Yu. Makovkin^{1*}, I.A. Kastalsky^{1, 2, 3}¹ National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation;² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation;³ Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

ABSTRACT

The investigation of nonlinear processes in brain systems based on the oscillatory-wave approach is currently one of the most consequential domains of researching signal generation and processing mechanisms in the brain. These investigations may offer insights into various phenomena, such as the mechanism of associative memory, based on network models of biologically relevant neurons. A neural network architecture is proposed in this paper to solve applied problems, such as signal filtering, processing, and recognition of information images. Mechanisms for incomplete fragments were implemented, enabling the extraction and complete restoration of objects from memory. Each neuron in this neural network comprises a Hodgkin–Huxley biophysical model with a Mainen modification, the dynamics of which most plausibly reproduce the processes in the neural cells of the brain.

In the research on individual neurons, a constant external current with varying amplitudes was applied. The study determined the average periods of self-oscillations and identified parameter values for the Andronov–Hopf bifurcation. In particular, a stable limit cycle is created and destroyed depending on different scenarios when the bias current is increased or decreased. A stable limit cycle arises via the Andronov–Hopf bifurcation and is terminated via the saddle-node bifurcation on the cycle.

The study identified parameter regions whereby two neurons with excitatory and inhibitory synaptic connections synchronize. The neurons were all in self-oscillating mode and exhibited a stable limit cycle in the phase space.

A three-layer neural network was constructed, comprising of a reference neuron, sensory, control, and interneurons. The control and intermediate layer connections are arranged based on the Hebbian learning rule.

Areas of excitation for various types of neurons were found.

Experiments were conducted using the neural network architecture to distinguish binary information patterns encoded through signal phase. Excitatory and inhibitory synaptic connections were employed to encode the images stored in memory. The dynamic patterns are determined through the in-phase or anti-phase mode of phase locking, i.e., phase synchronization relative to the global rhythm. Before reaching the output layer of neurons, the signals are summed on the interneuron layer with the signal of the reference neuron, resulting in the filtering out of a certain information segment (in-phase or anti-phase). The network accurately recognized the patterns after parameter adjustments were made.

Areas of neuron phase synchronization were discovered, enabling control of network activity modes. The confirmation of the viability of phase capture and pattern recognition modes using Hodgkin–Huxley–Mainen neurons was achieved.

In total, as a result of the implementation of the spike neural network modeling project:

- 1) two-parameter diagrams of regions of neuronal excitation in various modes are calculated;
- 2) the effect of excitatory and inhibitory coupling in synaptic currents is used to represent the input signal;
- 3) an abstract mathematical algorithm for calculating the Hebbian matrix has been transferred to the implementation of synaptic currents between layers of neurons;
- 4) the effect of phase clusters is used to represent the output pattern;
- 5) the neurons' topology in the visual-cerebral department served as a working model for recognizing graphic images through the Hopfield network on a spike neural network, using the Hebbian rule.

Keywords: neuron; synaptic connection; neuron network; Hebb's rule.

To cite this article:

Makovkin SYu, Kastalsky IA. Phase-locked states in a spiking neural network model with a context-dependent connectivity. *Genes & cells*. 2023;18(4):858–861. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623436>

Received: 10.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding sources. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

1. Hodgkin AL, Huxley AF. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J Physiol.* 1952;117(4):500–544. doi: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764
2. Makovkin SYu, Shkerin IV, Gordleeva SYu, Ivanchenko MV. Astrocyte-induced intermittent synchronization of neurons in a minimal network. *Chaos, Solitons & Fractals.* 2020;138:109951. doi: 10.1016/j.chaos.2020.109951
3. Gordleeva SY, Ermolaeva AV, Kastalskiy IA, Kazantsev VB. Astrocyte as spatiotemporal integrating detector of neuronal activity. *Front Physiol.* 2019;10:294. doi: 10.3389/fphys.2019.00294
4. Tsybina Y, Kastalskiy I, Krivonosov M, et al. Astrocytes mediate analogous memory in a multi-layer neuron–astrocyte network. *Neural Comput & Applic.* 2022;34:9147–9160. doi: 10.1007/s00521-022-06936-9
5. Makovkin S, Kozinov E, Ivanchenko M, Gordleeva S. Controlling synchronization of gamma oscillations by astrocytic modulation in a model hippocampal neural network. *Sci Rep.* 2022;12(1):6970. doi: 10.1038/s41598-022-10649-3

AUTHORS' CONTACT INFO

* S.Yu. Makovkin; address: 23 Gagarin avenue, 603022 Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: makovkin@neuro.nnov.ru