

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623516>

Поиск когнитивных специализаций нейронов с использованием взаимной информации

Н.А. Поспелов*, В.П. Сотсков, В.В. Плюснин, О.С. Рогожникова, К.А. Торопова, О.И. Ивашкина, К.В. Анохин

Институт перспективных исследований мозга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Особенный интерес для анализа когнитивных специализаций нейронов представляет их соотнесение с переменными внешней среды и поведением животного. Среди возможных мер такой взаимосвязи особенно выделяется взаимная информация (mutual information, MI), так как она чувствительна к их синхронизации, позволяет охарактеризовать нелинейные взаимосвязи между исследуемыми переменными и количественно охарактеризовать не только значимость связи, но и её силу. Однако существенная трудность заключается в практических сложностях расчёта MI для реальных данных. В данной работе нами были адаптированы современные методы расчёта MI для последующего анализа взаимосвязи между сигналом кальциевой флуоресценции и поведенческими переменными. Используемые методы были объединены в программный пакет под названием INTENS (INformation-Theoretic Evaluation of Neuronal Specializations), который использовали для поиска когнитивно специализированных нейронов в ходе анализа данных кальциевой активности гиппокампа при обследовании животными арены с разным уровнем новизны.

Существуют многочисленные методы анализа взаимосвязи между спайками нейрона и поведенческими переменными. Некоторые из них основаны на информационно-теоретическом подходе [1]. Однако особенный интерес представляет извлечение информации о связи кальциевого флуоресцентного сигнала с поведением, так как этот сигнал даёт важную дополнительную информацию о подпороговых активациях нейрона. В настоящей работе применяется метод вычисления взаимной информации, основанный на энтропии гауссовой копулы GCMi [2]. Метод основан на том факте, что взаимная информация между двумя случайными величинами зависит не от их частных распределений, но только от вида копулы (многомерного распределения, у которого каждое частное распределение равномерно).

Для того чтобы оценить значимость рассчитанной информационной связи между кальциевым сигналом и поведенческой переменной, истинная MI сравнивалась с её значениями, рассчитанными на сдвинутых относительно друг друга по времени сигналах. Был также разработан метод оценки величины эффекта связи: взаимная информация между флуоресцентным сигналом и поведением была нормирована на заранее рассчитанное значение энтропии каждой из этих случайных величин.

Важно, что описанный выше подход работает как для непрерывных величин (к примеру, кальциевый сигнал и скорость животного), так и для пар непрерывной и дискретной переменных (кальциевый сигнал и наличие/отсутствие груминга).

В ходе анализа записанных кальциевых сигналов зоны CA1 гиппокампа были выделены как специализации нейронов относительно внешней среды — нейроны места, так и специализации относительно поведенческих актов животного — нейроны, специфически активирующиеся при побегках, стойках, замирании и т.д. Были обнаружены нейроны, селективно активирующиеся относительно дополнительного набора дискретных параметров, представляющих собой комбинацию местоположения животного в арене (в центре, у стен, в углах) и скорости животного (покой, медленное и быстрое перемещение). Суммарно за все 4 сессии эксперимента была выявлена 781 специализация в 472 нейронах, при этом одни и те же нейроны могли иметь несколько специализаций. Однако большинство (55%) нейронов имели единственную специализацию.

Ключевые слова: кальциевый имаджинг; когнитивные специализации; взаимная информация.

Как цитировать:

Поспелов Н.А., Сотсков В.П., Плюснин В.В., Рогожникова О.С., Торопова К.А., Ивашкина О.И., Анохин К.В. Поиск когнитивных специализаций нейронов с использованием взаимной информации // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 878–881. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623516>

Рукопись получена: 15.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

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. Исследование выполнено при финансовой поддержке Некоммерческого Фонда развития науки и образования «Интеллект».

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strong S.P., de Ruyter van Steveninck R.R., Bialek W., Koberle R. On the application of information theory to neural spike trains // Pac Symp Biocomput. 1998. P. 621–632.
2. Ince R.A., Giordano B.L., Kayser C., et al. A statistical framework for neuroimaging data analysis based on mutual information estimated via a gaussian copula // Hum Brain Mapp. 2017. Vol. 38, N 3. P. 1541–1573. doi: 10.1002/hbm.23471

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* Н.А. Поспелов; адрес: Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1; e-mail: nik-pos@yandex.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623516>

Searching for cognitive specializations of neurons using mutual information framework

N.A. Pospelov*, V.P. Sotskov, V.V. Plusnin, O.S. Rogozhnikova, K.A. Toropova, O.I. Ivashkina, K.V. Anokhin

Institute for Advanced Brain Studies, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Of particular interest for researching the cognitive specializations of neurons is their correlation with environmental variables and animal behavior. Mutual information (MI) is a preferable method for measuring such correlations, as it allows for the assessment of non-linear relationships between variables, detects synchronization, and provides both significance and strength quantification. However, calculating MI for real data is significantly challenging. In this study, we used updated MI calculation techniques to analyze the connection between calcium fluorescence signaling and behavioral variables. Our approach encompasses novel strategies which we compiled into a software program known as INTENS (Information-Theoretic Evaluation of Neuronal Specializations), and it enabled to identify specialized neurons in mice hippocampal calcium activity data while they explored the arena with varying levels of novelty.

Numerous methods exist for analyzing the relationship between neuron spikes and behavioral variables, including information-theoretical approaches [1]. Extracting information about the relationship between calcium fluorescent signals and behavior is of particular interest due to the signal's ability to provide crucial information about subthreshold activations of the neuron. In this study, we use the GCMI Gaussian copula entropy method to calculate mutual information [2]. This method relies on the fact that mutual information between two random variables is independent of their marginal distributions and only depends on the type of copula used (a multidimensional distribution where each marginal distribution is uniform).

The actual MI was compared to its corresponding values computed on the time-shifted signals for assessing the statistical significance of the computed information association between the calcium signal and the behavioral variable. Additionally, we devised a technique for gauging the strength of the coupling effect. This involved normalizing the mutual information between the fluorescence signal and the behavior with the entropy value of both variables, previously calculated as random variables. Importantly, the approach outlined earlier is effective for analyzing continuous variables such as calcium signal and animal speed, as well as pairs of continuous and discrete variables such as calcium signal and the presence or absence of grooming. The analysis of calcium signals recorded from the CA1 region of the hippocampus revealed neuronal specializations related to the animal's external environment, such as place cells, and specializations related to its behavioral activities, including neurons activated during running, rearing, and freezing. Some neurons selectively activated in response to discrete parameters included the animal's location within the arena (center, walls, and corners) and its speed (rest, slow, and fast). A total of 781 specializations were detected across 472 neurons throughout all four sessions of the experiment. Notably, a single neuron could have several specializations. However, more than half (55%) of the neurons were found to have only one specialization.

Keywords: calcium imaging; cognitive specializations; mutual information.

To cite this article:

Pospelov NA, Sotskov VP, Plusnin VV, Rogozhnikova OS, Toropova KA, Ivashkina OI, Anokhin KV. Searching for cognitive specializations of neurons using mutual information framework. *Genes & cells*. 2023;18(4):878–881. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623516>

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. The research was supported by the Non-Commercial Foundation for Support of Science and Education "INTELLECT".

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

Received: 15.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

REFERENCES

1. Strong SP, de Ruyter van Steveninck RR, Bialek W, Koberle R. On the application of information theory to neural spike trains. *Pac Symp Biocomput.* 1998;621–632.
2. Ince RA, Giordano BL, Kayser C, et al. A statistical framework for neuroimaging data analysis based on mutual information estimated via a gaussian copula. *Hum Brain Mapp.* 2017;38(3):1541–1573. doi: 10.1002/hbm.23471

AUTHORS' CONTACT INFO

* N.A. Pospelov; address: 1 Leninskie Gory street, 119991 Moscow, Russian Federation; e-mail: nik-pos@yandex.ru