

УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ АКТИВАЦИИ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ АГЕНТОВ

Л.Ю. Жилиякова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: zhilyakova@ipu.ru

Ключевые слова: агенты с внутренней структурой, нейроноподобные агенты, полцентровые осцилляторы, нейронные ансамбли.

Аннотация: В работе предложена модель сложного нейроноподобного агента, обладающего внутренней структурой и способного эндогенно возбуждаться через некоторые интервалы времени. Под нейроноподобностью, кроме эндогенной активности, понимается наличие у агента таких же как у биологического нейрона входов и выхода. Входы агента задаются тремя видами рецепторов: возбуждающие, тормозные и модулирующие; выход – это возбуждение агента и тип, по которому это возбуждение происходит (у биологического нейрона «тип» соответствует определенному нейротрансмиттеру, секретируемому нейроном). Воздействие на модулирующие рецепторы изменяет внутренние параметры агента, за счет чего он изменяет время между двумя последовательными активациями. Воздействия на разные модулирующие рецепторы могут оказывать разные влияния: для одного типа рецепторов характерны кратковременные изменения параметров, что позволяет нейронным ансамблям быстро изменять паттерны активности и затем так же быстро восстанавливать их. Другой тип рецепторов при активации изменяет характеристики агентов, что может привести к структурным (долговременным) изменениям ансамблей и, таким образом, играет роль обучения.

1. Введение

В работе представлено исследование свойств нейроноподобных агентов, предложенных в [1]. Такие агенты способны генерировать эндогенную ритмическую активность. Показано, что для них могут быть реализованы механизмы управления длиной интервалов между всплесками активности. Таким образом, происходит запоминание временного интервала некоторой заданной длины.

Агенты обладают структурой, отчасти сходной со структурой биологических нейронов. Малые сети из предложенных агентов могут служить моделями центральных генераторов паттерна (Central Pattern Generator, ЦПГ) в простых нервных системах [2, 3]. ЦПГ определяют как сообщество нейронов, члены которого совместно порождают упорядоченную моторную выходную активность [4].

Выходная активность каждого агента не является бинарной характеристикой (активен/пассивен) – существует множество типов активности, которые соответствуют множеству нейротрансмиттеров, выделяемых нейронами в межклеточное пространство во время спайков. Каждый агент может быть активен по одному типу активности, однако воспринимает он множество разных типов, в зависимости от имеющихся у него рецепторов. Разнообразие нейротрансмиттеров присуще всем нервным системам, оно имеет очень важное значение для их функционирования [5, 6]. Посредством нейротрансмиттеров происходит не только взаимодействие между нейронами – они

выполняют также модулирующую функцию. Она заключается, в частности, в том, чтобы выделять из анатомических сетевых нейронных структур различные активные подсети с различными ритмами в зависимости от «контекста», то есть, химического состава внеклеточного пространства [2, 7-9].

Представленная в докладе модель основана на предыдущих исследованиях, развивавшихся в двух направлениях. Первое из них – модель гетерохимических бессинаптических взаимодействий нейронов [10, 11]. Было показано, что ансамбли, состоящие из таких нейронов, могут моделировать реальные ЦГП простых организмов, которые способны к изменению и даже обращению ритмов, что является биологически правдоподобным [12]. В [13] был предложен механизм переключения походки гексапода с трехногой на четырехногую с помощью эффекта нейромодуляции. Второе направление связано с моделированием гетерогенных агентов в социальных сетях, где под типами активности понимаются различные интересы пользователей [14, 15].

Модель, предложенная в данной работе, отличается от предыдущих прежде всего тем, что агенты наделяются внутренней активной структурой: у каждого агента внутри функционирует полуцентральный осциллятор [16, 17], который отвечает за способность агента к активации и длину рефрактерного периода.

2. Агенты и их внешние и внутренние параметры

$N = \{1, \dots, N\}$ – множество агентов с внутренней структурой, взаимодействующих в дискретном времени T . T – это *внешнее время*, синхронизированное для всех агентов. На каждом такте внешнего времени агенты могут быть пассивными либо активными по одному из m типов. Тип активности принимает значение из множества $C = \{c_1, \dots, c_m\}$; в модели считается, что каждому типу соответствует свой цвет.

Взаимодействие агентов является широкоэмитальным: они взаимодействуют через общую для всех среду. Если на такте t агент i был активен по цвету c_j , то на такте $t + 1$ его активность повлияет на всех его соседей, восприимчивых к этой активности, то есть имеющих рецепторы такого же цвета c_j . Рецепторы, кроме цвета, характеризуются *типом* и *весом*. Вес w_{ij} определяет силу воздействия пришедшего сигнала на агента. Здесь индекс i обозначает агента, а индекс j соответствует цвету c_j .

Агент может обладать рецепторами трех *типов*: *возбуждающими*, *тормозными* и *модулирующими* рецепторами. Возбуждающие и тормозные рецепторы агента i воздействуют напрямую на его активность: возбуждающие рецепторы, получив сигнал, заставляют агента активироваться быстрее и чаще; тормозные рецепторы уменьшают его активность. Эти два типа определяются знаком веса w_{ij} : для возбуждающих рецепторов $w_{ij} > 0$, для тормозных $w_{ij} < 0$.

Модулирующие рецепторы не влияют на активность агента напрямую, но при получении сигналов они запускают внутренние процессы, которые изменяют свойства агента таким образом, что он может перестроить свое функционирование.

Наличие рецепторов, их типы, веса и цвета, а также цвет выходной активности агента относятся к его *внешним параметрам*.

Внутренние процессы агента задаются сетью из трех узлов [1]. Два из них представляют собой постоянно активный *полуцентральный осциллятор*, представляющий собой два узла с возбуждающими связями, которые активны в противофазе. Он выступает в качестве внутреннего пейсмейкера и функционирует во внутреннем дискретном времени агента T_i . Это время может быть как быстрее, так и медленнее внешнего времени T . Чем активнее пейсмейкер, тем чаще агент активизируется самостоятельно. Осциллятор воздействует на третий элемент, в котором с помощью механизма памяти накапливается потенциал U_i .

Третий элемент, помимо потенциала, характеризуется глубиной памяти Θ , величиной порога Th_i и весами двух рецепторов (рис. 1). Когда накопленная память превышает пороговое значение, третий элемент подает сигнал к активации агента.

Формула для потенциала третьего элемента с памятью имеет вид (суммирование происходит во внутреннем времени агента):

$$U_i(t_i) = \sum_{\theta=0}^{\Theta-1} \mu_{i\theta} (w_{i1}I_1(t_i - \theta) + w_{i2}I_2(t_i - \theta)),$$

где $0 \leq \mu_{i\theta} \leq 1$ – коэффициенты, характеризующие забывание. Здесь i – агент, Θ – глубина памяти, $I_{1,2}(t - \theta)$ – индикаторная функция: $I_j(t_i - \theta) = 1$, если элемент j

($j = 1, 2$) полуцентрального осциллятора был активен на такте внутреннего времени $t_i - \theta$.

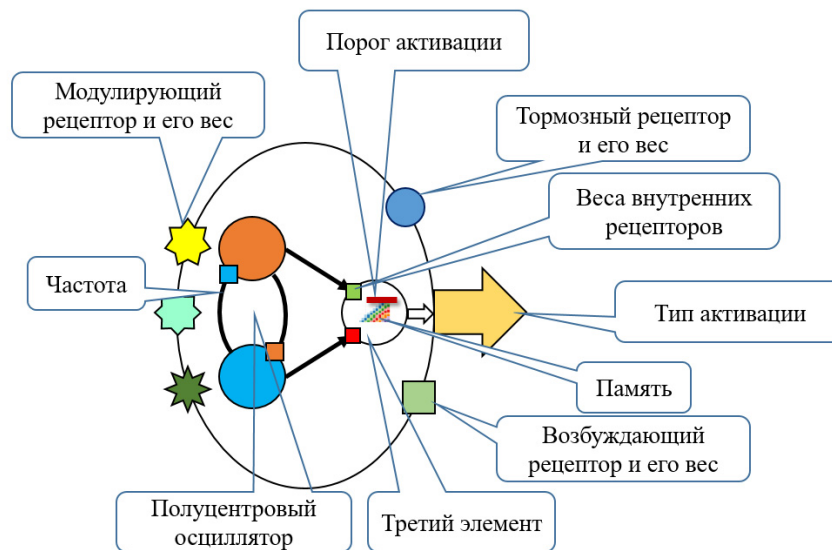


Рис. 1. Внешние и внутренние параметры агента.

Количество параметров агента достаточно велико. В следующем разделе мы покажем назначение каждого из введенных параметров в задаче запоминания временных интервалов. В [18] показано, что нейроны мозжечка способны к такого рода запоминанию.

3. Краткосрочное и долгосрочное изменение паттерна активности агента

Перечислим параметры внутренней сети агента, которыми можно управлять.

- 1) *Параметры третьего элемента.* Как уже было отмечено, он характеризуется (i) весами рецепторов, (ii) величиной порога активации и (iii) глубиной памяти.
- 2) *Параметры осциллятора* – ускорение или замедление ритма.
- 3) *Внешние параметры агента* – веса возбуждающих и тормозных рецепторов.

Будем считать, что параметры третьего элемента самые «подвижные». На их изменение требуются минимальные затраты. При этом, у них есть гомеостатические значения, к которым они возвращаются после того, как заканчивается внешнее воздействие.

Управление внутренними параметрами происходит через влияние на внешние параметры, представленные рецепторами трех типов: возбуждающие, тормозные, модулирующие. Причем, модулирующие рецепторы, в свою очередь, подразделяются на три вида.

Сигнал, пришедший на тормозный рецептор, повышает порог третьего элемента. Чем больше торможение, тем реже активируется третий элемент и, соответственно, агент. Активация происходит, пока у третьего элемента память достаточной длины. При сильном торможении памяти перестает хватать и агент становится неактивным (внешне).

Сигнал, пришедший на возбуждающий рецептор, увеличивает чувствительность третьего элемента (веса внутренних рецепторов) при неизменном пороге.

Разное воздействие возбуждения и торможения – важная особенность, которая приводит к возможности появления новых эффектов: когда агента одновременно

возбуждают и тормозят, он может начать осциллировать. Именно такие эффекты наблюдаются у некоторых биологических нейронов при воздействии на них двумя нейротрансмиттерами, один из которых является возбуждающим, а другой тормозным.

Как только сигнал, приходящий на возбуждающие и тормозные рецепторы заканчивается, порог и веса внутренних рецепторов третьего элемента возвращаются к значениям по умолчанию. Таким образом, агент изменяет поведение без запоминания. Сеть из таких агентов под внешними воздействиями может генерировать различные паттерны активности.

Модулирующие рецепторы создают более устойчивые изменения. Они осуществляют воздействия разных видов.

- 1) Изменение чувствительности элементов из полуцентрального осциллятора друг к другу, что влечет за собой изменение базовых свойств агента. Он будет подчиняться другому внутреннему ритму. Изменение внутреннего ритма, в свою очередь, влечет за собой изменение базовых свойств агента. Это наиболее долгосрочная память. Агент изменяет внутреннее состояние таким образом, что для него новое состояние является устойчивым.
- 2) Стационарное изменение свойств третьего элемента – изменение весов его рецепторов и порога. Это «среднесрочная» память. Третий элемент обладает более легко изменяющимися свойствами. Внутренний ритм агента остается без изменений.
- 3) Изменение весов внешних рецепторов. Такие изменения особенно удобны для выключения рецепторов и появления новых рецепторов. Именно они были применены в работе [13] для переключения между различными походками гексапода.

С помощью эффектов нейромодуляции становится возможным переключение аллюров в локомоторных генераторах паттернов, которое происходит без структурной перестройки сетей и без стационарных изменений свойств нейронов, формирующих эти сети. С помощью воздействий двух видов (пп. 1)-2) в списке), у агента изменяется интервал между двумя последовательными активациями. Таким образом, изменяя параметры, можно добиться запоминания временного интервала произвольной длительности и генерации активности с этим, наперед заданным, интервалом.

Более того, из-за различий в устойчивости изменений, можно моделировать обучение с забыванием или без забывания. Забывание позволит вернуться к гомеостатическим параметрам с некоторой, наперед заданной скоростью. Отсутствие забывания означает, что агент изменяет свои базовые свойства, и его гомеостатическое состояние соответствует новому набору параметров, полученному в процессе обучения.

4. Заключение

В работе описаны нейроноподобные агенты с внутренней структурой. Каждый агент имеет набор внешних и внутренних параметров. Внешние параметры – рецепторы, их типы, виды и веса, а также тип выходной активности агента; внутренние параметры задаются ансамблем из трех элементов, два из которых являются полуцентровым осциллятором, задающим ритм функционирования агента. Третий элемент аккумулирует активность осциллятора и дает команду к активации агента.

Такие агенты способны запоминать временные интервалы. В зависимости от вида воздействия на агента, это запоминание может быть устойчивым (структурным) или неустойчивым (функциональным). Малые сети из этих агентов могут перестраивать паттерны активности: изменять количество и длительность фаз – без структурных изменений сети и без долговременных изменений свойств самих агентов.

Список литературы

1. Zhilyakova L. Modeling Neuron-Like Agents with a Network Internal Structure // In: Kryzhanovsky B., Dunin-Barkowski W., Redko V., Tiumentsev Y., Klimov V. (Eds.) *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research VII. NEUROINFORMATICS 2023. Studies in Computational Intelligence*. 2023. Vol. 1120. Cham: Springer. P. 300-307.
2. Harris-Warrick R.M. Neuromodulation and flexibility in Central Pattern Generator networks // *Current Opinion in Neurobiology*. 2011. Vol. 21, No. 5. P. 685-692.
3. Marder E., Bucher D. Central Pattern Generators and the Control of Rhythmic Movements // *Current Biology*. 2001. Vol. 11, No. 23. P. 986-996.
4. Балабан П.М., Воронцов Д.Д., Дьяконова В.Е., Дьяконова Т.Л., Захаров И.С., Коршунова Т.А., Орлов О.Ю., Павлова Г.А., Панчин Ю.В., Сахаров Д.А., Фаликман М.В. Центральные генераторы паттерна (CPGs) // *Журн. высш. нерв. деят.* 2013. Т. 63, № 5. С. 1-21.
5. Dyakonova T.L., Sultanakhmetov G.S., Mezheritskiy M.I., Sakharov D.A., Dyakonova V.E. Storage and Erasure of Behavioural Experiences at the Single Neuron Level // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9, No. 1. 14733.
6. Aonuma H., Mezheritskiy M., Boldyshev B., Totani Y., Vorontsov D., Zakharov I., Ito E., Dyakonova V. The Role of Serotonin in the Influence of Intense Locomotion on the Behavior Under Uncertainty in the Mollusk *Lymnaea stagnalis* // *Frontiers in Physiology*. 2020. Vol. 11, Art. No. 221.
7. Bargmann C.I. Beyond the Connectome: How Neuromodulators Shape Neural Circuits // *Bioessays*. 2012. Vol. 34. P. 458-465.
8. Marder E., Weimann J.M. Modulatory Control of Multiple Task Processing in the Stomatogastric Nervous System: Neurobiology of Motor Programme Selection // *Pergamon*. 1992. P. 3-19.
9. Turrigiano G., LeMasson G., Marder E. Selective Regulation of Current Densities Underlies Spontaneous Changes in the Activity of Cultured Neurons // *Journal of Neuroscience*. 1995. Vol. 15, No. 5. P. 3640-3652.
10. Базенков Н.И., Воронцов Д.Д., Дьяконова В.Е., Жиликова Л.Ю., Захаров И.С., Кузнецов О.П., Куливец С.Г., Сахаров Д.А. Дискретное моделирование межнейронных взаимодействий в мультитрансмиттерных сетях // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2017. № 2, С. 55-73.
11. Кузнецов О.П., Базенков Н.И., Болдышев Б.А., Жиликова Л.Ю., Куливец С.Г., Чистопольский И.А. Асинхронная дискретная модель химических взаимодействий в простых нейронных системах // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2018. № 2. С. 3-20.
12. Bazenkov N.I., Boldyshev B.A., Dyakonova V.E., Kuznetsov O.P. Simulating Small Neural Circuits with a Discrete Computational Model // *Biol Cybern*. 2020. No. 114. P. 349-362.
13. Болдышев Б.А., Жиликова Л.Ю. Нейромодуляция как инструмент управления нейронными ансамблями // *Проблемы управления*. 2021. № 2. С. 76-84.
14. Zhilyakova L. Model of Heterogeneous Interactions Between Complex Agents. From a Neural to a Social Network // *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists // Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 636. P. 213-218.
15. Zhilyakova L.Yu. Modeling the Structure of MIMO-Agents and Their Interactions // Kuznetsov S., Panov A. (Eds.) *Artificial Intelligence. RCAI 2019. Communications in Computer and Information Science*. 2019. Vol. 1093. Cham: Springer. P. 3-16.
16. Emelin A., Korotkov A., Levanova T., Osipov G. Motif of Two Coupled Phase Equations with Inhibitory Couplings as a Simple Model of the Half-Center Oscillator // In: Balandin D., Barkalov K., Meyerov I. (Eds.) *Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies. MMST 2022. Communications in Computer and Information Science*. 2022. Vol. 1750. P. 82-94.
17. Ausborn J., Snyder A.C., Shevtsova N.A., Rybak I.A., Rubin J.E. State-dependent rhythmogenesis and frequency control in a half-center locomotor CPG // *J. Neurophysiol*. 2018. Vol. 119, No. 1. P. 96-117.
18. Narain D., Remington E.D., Zeeuw C.I.D., Jazayeri M. A cerebellar mechanism for learning prior distributions of time intervals // *Nat. Commun*. 2018. Vol. 9. Art No. 469.