

В.А. ВАСИЛЬКОВ, Р.А. ТИКИДЖИ – ХАМБУРЬЯН
НИИ Нейрокибернетики им. А.Б. Когана, Южный Федеральный Университет
vasilkov_va@mail.ru, tikiidji_ham@krinc.ru

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ КОРОТКИХ ВРЕМЕННЫХ
ЗАДЕРЖЕК ОДНОРОДНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ С
НЕЛИНЕЙНЫМИ БИОЛОГИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫМИ,
ЕДИНИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В ПРИСУТСТВИИ
БЕЛОГО БИПОЛЯРНОГО ШУМА.**

Представлены результаты численного исследования способности искусственной нейронной сети, базирующейся на биологически адекватной нелинейной модели нейрона (модель Ижикевича), детектировать короткие временные задержки во входном сигнале. Рассмотрена устойчивость работы предложенной модели при наличии биполярного белого шума различной амплитуды в активности единичного элемента сети. Показана возможность нивелирования влияния стохастических компонент активности нейрона на способность нейронной сети детектировать временную задержку.

Введение. Возможность слуховой системы млекопитающих локализовать источник звука в пространстве обусловлена ее способностью распознавать короткие межшумные временные задержки (20мкс – 1.2мс) [1]. Известны различные объяснения того, как нейронная система с характеристическими постоянными времени единичных элементов не менее 0.7 мс может детектировать столь короткие временные задержки. Преобладающей в настоящее время гипотезой является предположение о существовании детекторов совпадения, которые оперируют частотно разделенными сигналами, имеющими фиксированную фазу [1 - 9]. Наряду с этим в слуховых отделах коры мозга экспериментально выделяют три класса специфических нейронов, так называемых E-E, E-0 и E-I [1, 3, 10]. Наиболее широко представлены в слуховой коре E-I нейроны [10]. Результаты, полученные на упрощенной модели популяции таких клеток, показали, что они могут не только выступать в роли грубого детектора левой или правой стороны расположения источника звука, как это предполагалось ранее, но и относительно большая популяция E-I нейронов способна детектировать межшумные временные задержки с высокой точностью [1].

В настоящей работе представлены результаты численного исследования способности гомогенной популяции E-I нейронов детектировать короткие временные задержки во входном сигнале. По аналогии с работой [1] исследуется модель, имитирующая две конкурирующие популяции E-I клеток. Однако, в отличие от предыдущих работ, исследуемая модель базируется на биологически более правдоподобной нелинейной модели единичного нейрона (модели Ижикевича [11]).

Модель нейронной сети. В работе рассматривается искусственная нейронная сеть, имитирующая поведение двух конкурирующих популяций E-I нейронов слуховой коры млекопитающих. Обе популяции, как и элементы внутри каждой из них, не имеют между собой прямых взаимодействий. Все единичные модели нейронов каждой из конкурирующих групп получают входы разной полярности от двух входных элементов. Каждый входной элемент образует возбуждающий синапс с единичными элементами контралатеральной популяции и тормозный с элементами ипсилатеральной группы. Параметры моделей нейронов в популяциях гомогенны, в то время как сила входных воздействий (веса как тормозного, так и возбуждающего синапсов) имеют существенную вариабельность. Оценка точности и интервал устойчивости детектирования определялись варьированием количества элементов и диапазона весов входных воздействий. Модель строится из предположения, что сигнал с фиксированной временной задержкой (соответствующий определенному азимутальному расположению источника звука) мгновенно появляется на входных элементах и до этого не претерпевает изменений ни по амплитуде, ни по длительности, а возможность детектирования определяется лишь свойствами популяции в целом.

Модель нейрона и синаптической передачи. Для численного исследования в качестве единичного элемента сети использовалась нелинейная модель нейрона Ижикевича [10]. Выбранная модель позволяет биологически адекватно имитировать поведение реального нейрона, одновременно обеспечивая относительно низкую ресурсоемкость вычислительного эксперимента, что позволяет варьировать размерность исследуемой сети при поиске количества элементов, минимально достаточного для детектирования короткой временной задержки с заданной точностью.

Для модели Ижикевича характерны несколько режимов активности, каждому из которых соответствует определенный набор значений параметров [11]. При исследовании способности нейронной сети детектировать короткие фазовые задержки, модель Ижикевича использовалась в нескольких режимах активности (“regular spiking”, “intrinsically bursting”, “fast spiking” [11]). Для всех трех типов были получены качественно сходные результаты.

С целью получения биологически наиболее адекватного результата использовалась реверсная модель синапса [12]. При проведении вычислительного эксперимента для параметров синаптической модели были заданы следующие значения: для возбуждающего синапса величина $E_{syn} = 55$ мВ, $\alpha = 1$, $\tau = 5$ мс, для тормозного - $E_{syn} = -100$ мВ, $\alpha = 5$, $\tau = 40$ мс.

Численный эксперимент. Исследуемая модель нейронной сети состояла из двух популяций, каждая из которых содержала около ста нейронов (при меньшем количестве элементов точность детектирования значительно снижается). Для наглядности выхода модели распределение проводимостей синапсов задавалось по линейному закону. Для возбуждающего синапса значения проводимости ограничивались интервалом 6 ± 0.15 мСм, для тормозного 67 ± 2.5 мСм, при этом крайний «левый» элемент популяции получал наиболее сильный тормозной вход и минимальное возбуждение. У крайнего «правого» элемента сила тормозного входа была наименьшей, и он получал максимальное возбуждающее воздействие. Визуальный анализ ответа каждой из популяций при предъявлении единичного стимула проводился с помощью растровых диаграмм импульсной активности каждого нейрона (Рис. 1а, Рис. 1б). Для интегральной оценки определялось количество импульсов у всех нейронов в каждой из популяций в заданном временном интервале после предъявления стимула и строилось распределение этой величины в зависимости от задержки Δt (Рис. 1в, Рис. 2). Данное распределение считалось передаточной характеристикой модели.

В эксперименте рассматривалась активность популяции нейронов при стимуляции короткими входными стимулами, по аналогии с психофизическими исследованиями [13]. При этом каждый входной стимул состоял из пары импульсов, подаваемых с различной фазовой задержкой (от -10мс до +10мс). Ответ сети анализировался в течение 200 мс после предъявления стимула, затем модель инициализировалась заново.

Для количественной оценки способности модели нейронной сети детектировать короткие временные задержки использовался численный критерий качества детектирования, определяемый как отношение среднего изменения количества импульсов в популяции нейронов к общему количеству нейронов и изменению величины фазовой задержки [14]:

$$\Phi = \frac{1}{m \times k} \sum_{i=1}^{m \times k} \frac{\Delta N_i}{N \times \Delta T_i},$$

где N – количество элементов сети, ΔN – изменение количества импульсов популяции нейронов при изменении временной задержки Δt на величину ΔT , m – количество предъявляемых стимулов с данными значениями Δt в одном тесте, k – общее число тестов (численных экспериментов). Для данной оценки использовалась линейная часть передаточной характеристики в окрестности нуля. Данный критерий описывает величину прироста импульсной активности популяции к изменению Δt . Уменьшение его абсолютной величины свидетельствует о снижении способности модели детектировать фазовые задержки.

Ответы сети на предъявляемые стимулы с различной величиной короткой временной задержки в разных масштабах представлены на Рис. 1 и Рис. 2. Видно, что увеличение или уменьшение фазовой задержки существенно влияет на импульсную активность популяций нейронов. При параметрах, описанных выше, критерий качества Φ составлял 0.54 отн.ед.

На гистограмме, иллюстрирующей ответы сети (Рис. 1), можно выделить четыре интервала: (а) $[-4, -2.5] \cup [2.5, 4]$ мс – участок, на котором происходит выравнивание ответов обеих популяций, (б) $[-2.5, -0.8] \cup [0.8, 2.5]$ мс - участок с сильным насыщением, (в) $[-0.8, -0.4] \cup [0.4, 0.8]$ мс - нелинейный участок без насыщения и (г) $[-0.4, 0.4]$ мс - относительно линейный участок. Некоторые из этих интервалов коррелируют с данными тестов, проведенных в психофизических исследованиях [13]. Так, участок (г) соответствует интервалу междушумных задержек, в котором испытуемым достаточно четко локализуется источник звука. Для участка (б) изменения временной задержки Δt не влияют на активность сети, что хорошо коррелирует с «зависанием» субъективного источника звука в психофизических тестах, характерным для восприятия стимулов со значением Δt в этом интервале. На (а) происходит интенсивное выравнивание активности обеих популяций, что соответствует возникновению «эха» и/или распознаванию сигнала как

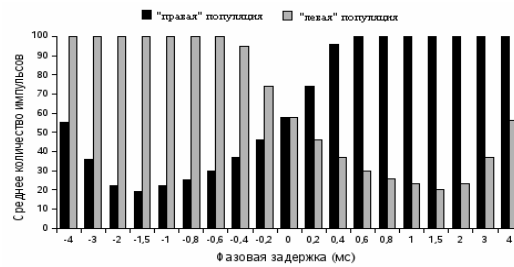
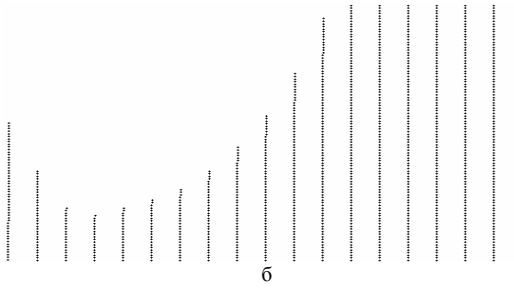
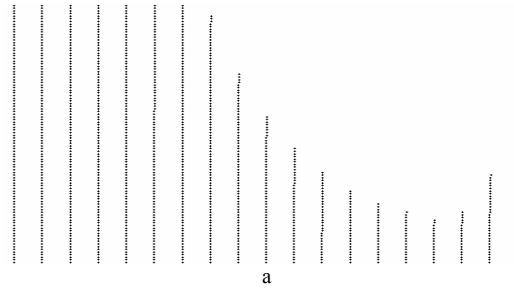


Рис. 1. а) и б) растровые диаграммы ответов («левой» и «правой» популяции соответственно) нейросетевой модели на входной сигнал с временной задержкой в интервале $[-4, 4]$ мс (каждая точка – импульс модели единичного нейрона, каждому нейрону популяции отводится одна индивидуальная строка, каждый столбец соответствует ответу популяции при предъявлении единичного стимула). в) среднее количество импульсов в каждой группе. Значение задержки Δt в стимулах на рисунках (а) и (б) слева направо соответствует подписям под гистограммой (в).

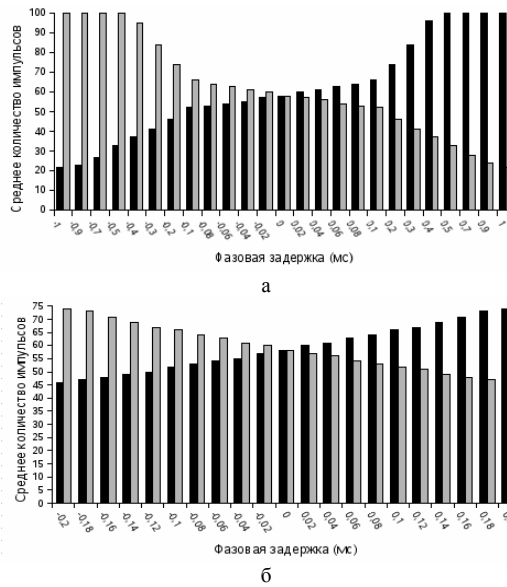


Рис. 2. Гистограммы ответов нейронной сети, идентичные Рис. 1в, приведенные в следующих масштабах Δt : а) [-1, 1] мс, б) [-0.2, 0.2] мс.

двух различных стимулов («расщепление субъективного источника звука» по [13]).

Описанный выше численный эксперимент проведен на модели при отсутствии стохастических компонент в активности нейрона. Для исследования зависимости ответов популяции от амплитуды шумовой компоненты активности единичного нейрона в модель вводились генераторы подпорогового шумового тока, инжектируемого в нейрон.

На Рис. 3 показана зависимость критерия Φ от величины амплитуды биполярного белого шума. Видно, что увеличение амплитуды шума приводит к уменьшению Φ и, следовательно, к ухудшению детектирования фазовых задержек популяцией. С другой стороны, при фиксированной амплитуде шума увеличение количества нейронов в популяции приводит к возрастанию Φ . Таким образом, увеличение размерности популяции позволяет нивелировать влияние шума на детектирование коротких временных задержек.

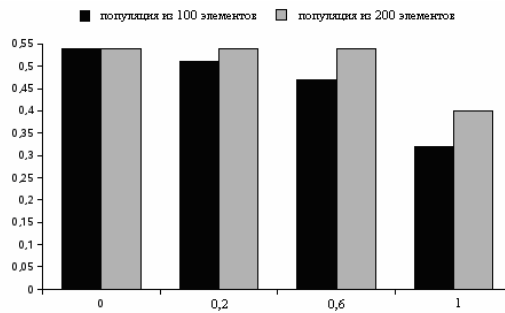


Рис. 3. График зависимости величины численного критерия качества детектирования Φ от амплитуды биполярного белого шума. По оси ординат - значения Φ (отн. ед.), по оси абсцисс – амплитуда шума (пА).

Заключение. Результаты численного исследования представленной нейросетевой структуры, базирующейся на нелинейной модели нейрона Ижикевича, показали способность предложенной нейросетевой модели (при количестве единичных элементов не менее 100) детектировать короткие межимпульсные временные задержки во входном сигнале и, как следствие, азимут источника звука с высокой точностью. Детектирование происходит за счет интегрирования возбуждающего и тормозного воздействий различной амплитуды и длительности единичными элементами сети и основано на оценке импульсной активности каждой из групп.

Исследовано влияние изменения амплитуды шумовой компоненты активности единичной модели нейрона на количество нейронов, вовлеченных в импульсную активность по популяции в целом и, как следствие, на способность нейронной сети детектировать короткую временную задержку. Показана возможность нивелирования данного влияния увеличением размерности популяции.

Вероятно, представленный механизм обработки коротких временных задержек нейронной сетью, содержащей две конкурирующие популяции E-I нейронов, может вносить определенный вклад в способность реальной слуховой локализовать источник звука в пространстве, дополняя хорошо известную систему на базе детекторов совпадения [1, 4, 7 - 9].

Список литературы

1. Тикиджи-Хамбурьян Р.А., Полевая С.А. Локализация источника звука искусственной нейронной сетью, основанной на модифицированных импульсных нейронах со следовой поляризацией. - *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2004, № 11, с. 41-45.
2. Gold J.I., Knudsen E.I. A Site of Auditory Experience-Dependent Plasticity in the Neural Representation of Auditory Space in the Barn Owl's Inferior Colliculus. - *J. Neuroscience*, 2000, pp.3469-3486.
3. Gerstner W., Kistler W.M. *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. - Cambridge University Press, 2002.
4. Saberi K., Farahbod H., Konishi M. How do owls localize interaurally phase-ambiguous signals? - *Neurobiology*, 1998, vol. 95, pp. 6465–6468.
5. Viete S., Pena J. L., Konishi M. Effects of Interaural Intensity Difference on the Processing of Interaural Time Difference in the Owl's Nucleus Laminaris. - *J. Neuroscience*, 1997, pp. 1815–1824.
6. Joris P.X., Smith P.H., Yin T. Coincidence Detection in the Auditory System: 50 Years after Jeffress. - *Neuron*, 1998, vol. 21, pp. 1235–1238.
7. Kuba H., Ishii T.M., Ohmori H. Axonal site of spike initiation enhances auditory coincidence detection. - *Nature*, 2006, vol. 444, pp. 1069-1072.
8. Burger R.M., Cramer K.S., Pfeiffer J.D., Rubel E.W. Avian Superior Olivary Nucleus Provides Divergent Inhibitory Input to Parallel Auditory Pathways. - *J. Comparative Neurology*, 2005, pp. 6-18.
9. Fitzpatrick D.C., Kuwada S. Tuning to Interaural Time Differences across Frequency. - *J. Neuroscience*, 2001, pp. 4844-4851.
10. Liu W., Suga N. Binaural and commissural organization of the primary auditory cortex of the mustached bat. - *J. Comp. Physiol.*, 1997, pp. 599-605.
11. Izhikevich E.M. Simple Model of Spiking Neurons. - *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2003, vol. 14, № 6, pp. 1569 – 1572.
12. Compte A., Sanchez-Vives M. V., McCormick D. A., Wang X.-J. Cellular and Network Mechanisms of Slow Oscillatory Activity (<1 Hz) and Wave Propagations in a Cortical Network Model. - *J. Neurophysiol.*, 2003, pp. 2707-2725.
13. Полевая С.А., Еремин Е.В. Компьютерные технологии для исследования структуры субъективного сенсорного пространства человека. - *Нижегородский медицинский журнал*, 2003, т.1, с. 17 – 21.
14. В.А. Васильков, Р.А. Тикиджи-Хамбурьян. Исследование возможных механизмов детектирования коротких временных задержек популяцией E-I нейронов. - *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*, 2008, (в печати).