

ПЛАСТИЧНЫЕ ФРАКТАЛЬНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕМРИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Алюшин А.В.,¹ Архангельский В.Г.,² Алюшин С.А.³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, г. Москва Каширское шоссе, д. 31
avalyushin@mail.ru,

²Федеральное государственное автономное научное учреждение ЦИТИС,
Россия, г. Москва, Пресненский Вал, д. 19, стр. 1
citis@arkhang.ru,

³ООО «Глоубайт консалтинг», Россия, г. Москва, Нижний Сусальный пер., д.5, стр. 19
sergeyaluyushin@gmail.com

Аннотация: Рассмотрен фрактальный подход к описанию нейрона, в соответствии с которым его внутреннюю архитектуру следует анализировать как повторяющуюся сетевую структуру функциональных устройств на различных уровнях детализации. Предложена концепция импульсного нейрона с фрактальной мемристивной структурой.

Ключевые слова: искусственные нейроподобные системы, мемристор, фракталы.

Введение

Используемый интегральный макро-уровень абстракции в классических коннективистских моделях импульсной нейронной сети обусловлен как уровнем знаний о функционировании биологической нейронной сети, так и уровнем развития микроэлектронных средств ее эмуляции [1].

В данной работе предлагается использовать фрактальный подход к описанию свойств нейросети и ее элементов, в соответствии с которым нейрон представляет из себя значительно более сложной функциональное устройство с собственной иерархической внутренней структурой, масштабность которой определяется степенью детализации в описании его физико-химических и биологических свойств. На каждом уровне детализации в описании свойств внутренней структуры нейрона можно выделить соответствующие функциональные устройства – фрактальные функциональные устройства (ФФУ) и определенную архитектуру их взаимодействия.

1 Современное развитие крупномасштабных мемристивных систем на основе функциональных элементов

Гибридные технологии совмещения мемристивных элементов со стандартными аналого-цифровыми CMOS схемами предоставляют разработчикам искусственных электронных нейросетей новые возможности по аппаратной реализации [2 - 4] пластичных фрактальных нейросетей, новых уровней функциональной обработки данных внутри отдельного нейрона. При этом для эффективного управления развитием крупномасштабных фрактальных нейроподобных систем необходима разработка как эффективных моделей ФФУ на различных уровнях детализации в описании свойств нейрона, так и соответствующих архитектурных решений сети ФФУ.

2 Нейрон с фрактальной мемристивной структурой

Дендритные окончания способны сами генерировать электрические импульсы – локальные потенциалы действия. Функциональное нелинейное преобразование и обработка данных на основе нелинейных потенциал зависимых ионных каналов осуществляется не только в триггерной зоне аксона и в самом аксоне, но и в других частях клетки нейрона, например в дендритах. При этом разнообразие функциональной обработки основывается на разнообразных механизмах ионной проводимости мембраны дендритов, являются основой функционально насыщенной пространственно-временной обработки потоков входной сигнальной информации от синаптических связей. Основными требованиями к ФФУ при таком подходе могут быть: гетерогенный состав каналов в ФФУ; достаточно широкий диапазон адаптации; наличие свойств локальной памяти и селективная пластичность новых ФФУ.

3 Архитектура нейронной сети на основе ФФУ

Пределным случаем является полностью связанная с соответствующими дендритными слоями соседних нейронов сеть ФФУ. Горизонтальные многоуровневые дендритные связи в группе соседних нейронов расширяют функциональные возможности рассматриваемой архитектуры по распознаванию входных последовательностей данных, предсказанию, корреляционного анализа и адаптивной обработке данных в сети фрактальных нейронов.

4 Импульсный нейрон с фрактальной мемристовой структурой

Ионные каналы мембраны нейрона и, соответственно, ФФУ на их основе являются мемристовыми функциональными устройствами с поведением типа $Y = g(X, \chi, t)X$, $d\chi/dt = f(X, \chi, t)$,

где X и Y – соответственно входной и выходной сигнал, χ – переменная внутреннего состояния, f – непрерывная n -мерная функция, n – количество внутренних состояний, g – непрерывная скалярная функция [4]. Импульсный нейрон с фрактальной мемристовой структурой характеризуется аналогичными закономерностями на всех уровнях описания его внутренней структуры.

5 Сравнительный анализ модели ФФУ на основе ионных каналов и модели мемристора

Результаты сравнения функционального поведения одиночного ионного канала (K) (Hodgkin-Huxley [5]) с моделью 1C1R1MOS функциональной моделью мемристора [6-8] представлены на рис.1. Аналогичное сравнение было выполнено и для других типов ионных каналов и их популяций в ФФУ.

Сравнительный анализ показывает высокую степень идентичности в функциональном поведении ионных каналов и соответствующих электронных мемристовых элементов, в частности:

- одинаковую частотную селективность в диапазоне частот 10 – 1000 Гц;
- сравнимый диапазон пластичности за счет соответствующего изменения значения переменной внутреннего состояния;
- наличие локальной памяти сравнимого объема, определяемого одинаковым динамическим диапазоном изменения величины переменной внутреннего состояния.

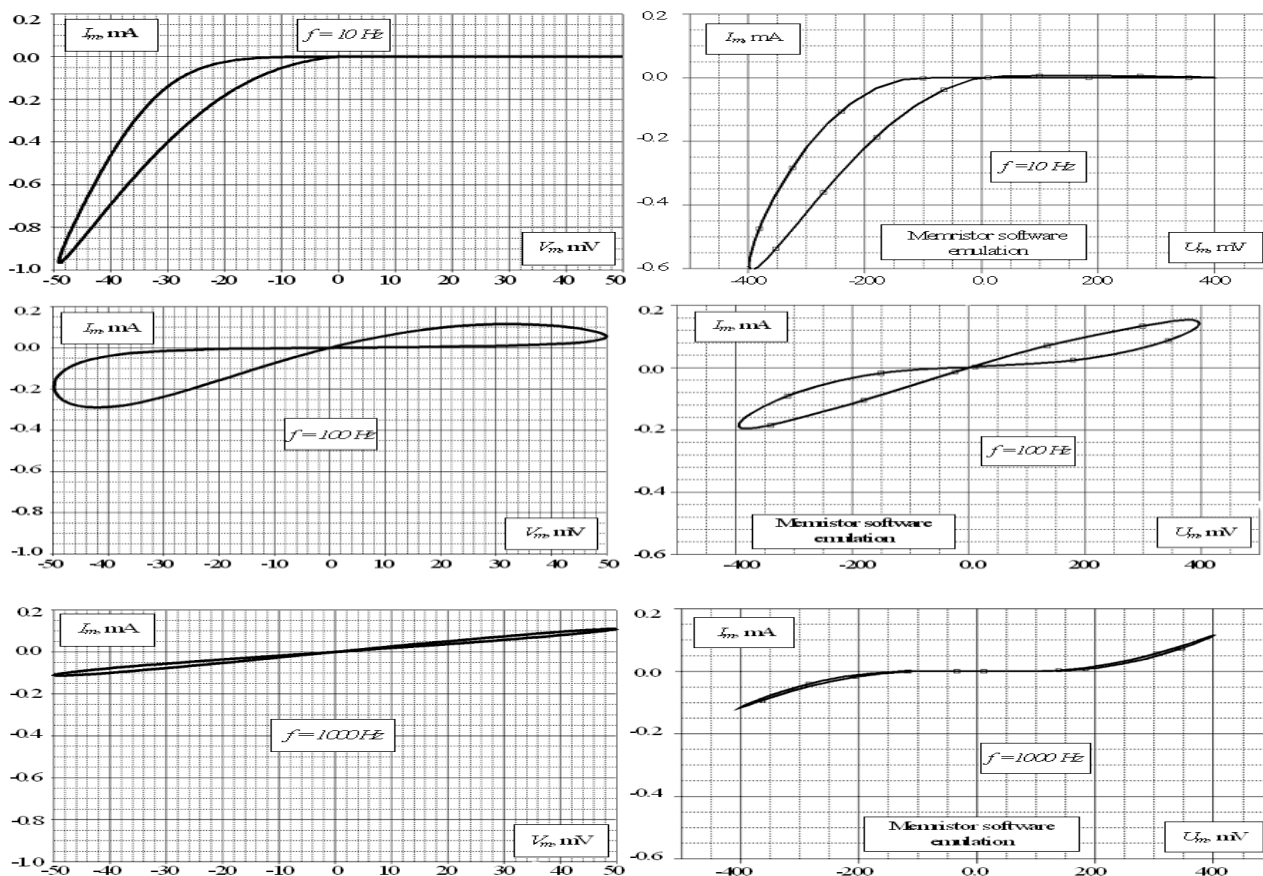


Рис. 1. Результаты моделирования отклика ионного канала (слева) и мемристового элемента (справа) для синусоидального воздействия с частотой $f = 10, 100, 1000$ Hz

Экспериментальное исследование мемристовых 1C1R1MOS ФФУ подтвердило эффективность их применения для твердотельной эмуляции пластичных фрактальных архитектур и их функциональную эквивалентность соответствующим биологическим аналогам (см. рис. 2) [9 – 11].

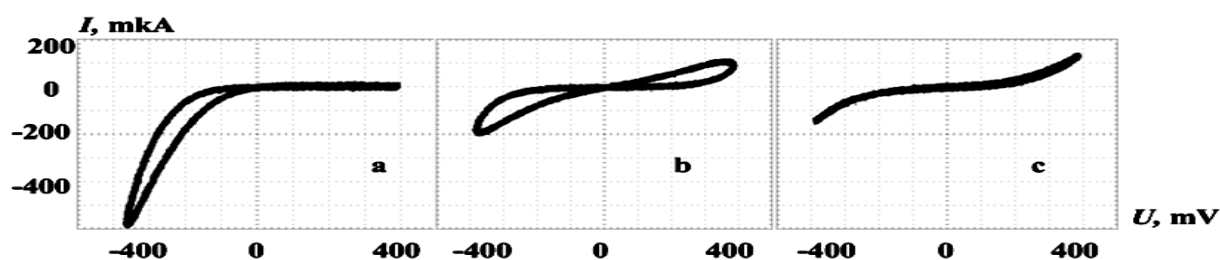


Рис. 2. Экспериментальные характеристики пластичного твердотельного мемристивного элемента в частотной области (a – 10 Hz, b – 100 Hz, c - 1000 Hz)

Выводы

Фрактальный нейрон с пространственно распределенной параллельной потоковой обработкой данных на основе мемристивных элементов, сеть искусственных фрактальных нейронов с массово параллельной многопоточной коррелированной обработкой данных являются перспективной элементной базой для интеллектуального анализа и обработки больших объемов информации в крупномасштабных применениях.

Литература

1. Alyushin A.V., Alyushin M.V., Alyushin S.A. Electronic neural net design methodology // Proceedings of the 5th. Int. Conf. and Exhibition “Digital signal processing and its applications”, Moscow, Russia, March 12-14, 2003. - P.585-587.
2. Alyushin A.V., Alyushin M.V., Alyushin S.A. The net of pulsed neurons with the delay on the basis of the analog-digital field programmable integrated circuit // Proceedings of the 5th. Int. Conf. and Exhibition “Digital signal processing and its applications”, Moscow, Russia, March 12-14, 2003. - P.582-585.
3. Alyushin A.V., Arkhangelsky V.G., Alyushin S.A. Self-organization in the development of scalable, “intellectual” structures on the basis of analog-digital nets of pulsed neurons for processing large amounts of information // Proceedings of the 2018 Eleventh Int. Conf. “Management of large-scale system development” (MLSD), 2018, Moscow, Russia, IPS RAS, - P.1-4.
4. Chua L.O., Kang S.M. Memristive devices and systems // Proc. IEEE 64(2), 1976, - P.209-223.
5. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // J. Physiol. 1952, 117, - P.500-544.
6. Alyushin A.V., Arkhangelsky V.G., Alyushin S.A. Memristive element functional model for the analysis and hardware emulation of highly integrated neural signal processing systems // Proceedings of 21st Int. Conf. Digital signal processing (DSPA – 2019), Moscow, Russia, March 27 – 29, IPS RAS, Vol. 3-4, -P.418-423.
7. Alyushin A.V., Arkhangelsky V.G., Alyushin S.A. Functional model of Memristive element for computer based analysis and hardware emulation of adaptive networks of pulsed neurons // Proceedings of the 2019 IEEE Conf. of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (ElConRus), Jan. 28-31, 2019, to be published.
8. Arkhangelsky V.G., Alyushin A.V., Alyushin S.A. Scalable reconfigurable Memristive synaptic structures as the basis of the mechanisms of plasticity in the developing and self-organizing networks of artificial pulsed neurons // Proceedings of the 2019 IEEE Conf. of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (ElConRus), Jan. 28-31, 2019, to be published.
9. Alyushin A.V., Alyushin S.A., Arkhangelsky V.G. Electrical activity signal spectrum of the artificial neural net on the base of pulsed neurons and memristors // Proceedings of the IEEE Conf. of Russian young researchers in electronic engineering (ElConRus2018), Moscow, Russia, January 29-31, Part 2. 2018. - P.1856-1862.
10. Alyushin A.V., Alyushin S.A., Arkhangelsky V.G. Development and analysis of analog-digital neural net for speech stress detection // Proceedings of the IEEE Conf. of Russian young researchers in electronic engineering (ElConRus2018), Moscow, Russia, January 29-31, Part 2. 2018. - P.1817-1822.
11. Alyushin A.V., Arkhangelsky V.G., Alyushin S.A. Structural and schematic methods of projecting the properties of biological neuron networks on the architecture of modern integrated neuron-like systems with analog-digital information processing // Proceedings of the 2019 IEEE Conf. of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (ElConRus), Jan. 28-31, 2019, to be published.