

# Разработка программного обеспечения для детектирования сна у грызунов на основе технологии параллельных вычислений

Р.В. Уколов  
Саратовский национальный  
исследовательский университет им.  
Н.Г. Чернышевского  
Саратов, Россия  
trustgreen1@mail.ru

М.О. Журавлев  
Саратовский национальный  
исследовательский университет им.  
Н.Г. Чернышевского  
Саратов, Россия  
zhuravlevmo@gmail.com

А.Е. Руннова  
Саратовский государственный  
медицинский университет им.  
В.И. Разумовского  
Саратов, Россия  
a.e.runnova@gmail.com

**Аннотация**—В данной работе продемонстрирована возможность применения методов параллельных вычислений с использованием вейвлет-преобразования с материнским вейвлетом Морле на ЭКоГ записях для выявления точных моментов засыпания и пробуждения у грызунов. Разработанное программное обеспечение использует интерфейс программирования приложений CUDA для реализации параллельных вычислений на большом количестве графических процессоров. Как итог, удалось достичь как высокой точности, так и быстрой работы, по сравнению с тем же методом, написанным на языке программирования Fortran для одного потока на центральном процессоре, для сложных вейвлет-вычислений с возможностью анализа нескольких каналов ЭКоГ.

**Ключевые слова**— параллельные вычисления, вейвлет, непрерывное вейвлет-преобразование, cuda, ЭКоГ, ЭЭГ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На настоящий момент вопрос исследования биомедицинских сигналов и, в особенности, активности головного мозга активно изучается с помощью методов нелинейной физики, визуализации, информационных технологий и т.д. В научной среде, как и в клинической практике, часто используется метод электроэнцефалографии (ЭЭГ), позволяющий проанализировать биоэлектрическую активность поверхностных структур головного мозга [1-4]. Данный метод позволяет дать как качественную, так и количественную оценку мощности колебаний на разных частотных диапазонах.

Для анализа динамики сигналов ЭЭГ зачастую применяют методы оценки колебательной активности на основе Фурье- и вейвлет-преобразований [5-9]. В данной работе представлен анализ ЭЭГ (в случае грызунов – ЭКоГ – электрокортикография [10-13]) с использованием вейвлет-преобразования с материнским вейвлетом Морле, позволяющий проводить вычисления с высокой скоростью и точностью при условии выполнения расчетов параллельно. В свою очередь, по сравнению с однопоточными, параллельные вычисления предоставляют возможность взятия больших интервалов частот для анализа или же более точного анализа заданного интервала (уменьшении шага частотной характеристики).

## 2. МЕТОДИКА

Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП)  $W_i(f, t)$  рассчитывалось для каждого сигнала ЭКоГ на основе вейвлета Морле с параметром  $\Omega = 2\pi$ . При заданной величине параметра шкала времени в НВП

аппроксимируется классическим представлением частоты Фурье  $f$ , Гц.

Для автоматического обнаружения момента засыпания опытным путем установлено, что максимальное качество и скорость обнаружения достигаются при анализе сигнала в частотном диапазоне  $\Delta f = [0,2; 20]$  Гц с шагом 0,1 Гц, при этом в случае однопоточных вычислений максимально допустимым диапазоном являлся  $[5; 10]$  Гц.

В разработанном программном обеспечении значения НВП параллельно вычислялись для каждого момента времени  $t$ .

Для всех каналов энергия НВП рассчитывалась следующим образом:

$$E_i(f, t) = W_i(f, t)^2 \quad (1)$$

Для каждого временного окна, равного 20 отсчетам, получившиеся значения были просуммированы по всему частотному диапазону и временному окну для всех каналов ЭКоГ, далее были взяты средние арифметические полученных данных по всем каналам (пусть количество каналов –  $N$ ) и поделены на количество временных отсчетов (20 отсчетов):

$$E'(f, t) = (\sum_{i=1}^N E_i(f, t)) / (N * 20) \quad (2)$$

Далее средние значения энергии НВП  $E'$  были усреднены (обозначаются как  $avgE$ ) во временном окне, равном 500 отсчетам, для каждого момента времени, также в ходе этих вычислений бралось общее среднее значение энергии НВП  $T$  для временных окон, равных 8000 секундам. Из общих средних энергии НВП  $T$  были выведены пороговые значения для данных временных отрезков: верхний порог  $T \uparrow$  брался равным  $1,3 * T$ , нижний  $T \downarrow - 0,45 * T$ .

Тогда моментом засыпания является тот момент времени, когда анализируемое значение  $avgE$  превысит порог  $T \uparrow$ , а моментом пробуждения – когда  $avgE$  станет ниже  $T \downarrow$ , при условии, что ему предшествовал момент засыпания.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Тестирование разработанного программного продукта проводилось на готовых ЭКоГ записях, которые предварительно были проанализированы нейрофизиологом с помощью видео-ЭКоГ.

Рассматриваемое программное обеспечение верно выявило моменты засыпания и пробуждения крыс со средней точностью 92% в соответствии с таблицей I.

Таблица I. ЗНАЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛА И КОНЦА СНА

Номер крысы	Относительная точность	
	днач, %	дкон, %
1	96,53	94,7
2	94,55	97,29
3	88,41	96,12
4	90,35	86,22
5	86,75	89,43
6	83,88	91,39
7	99,09	91,59
8	76,13	81,85
9	83,46	90,33
10	92,32	93,84
11	94,94	96,31
12	99,23	97,34
13	82,52	87,36
14	87,15	90,14
15	92,38	89,65
16	91,97	95,98

Стоит отметить, что применение параллельных вычислений позволяет не только увеличить анализируемый частотный диапазон, но и использовать рассматриваемый метод в режиме реального времени, одновременно с процессом записи ЭКоГ.

Изначально метод был создан с помощью языка программирования Fortran для одного потока на центральном процессоре [14] и на файле в шестнадцать миллионов значений на двух каналах работал 6935 секунд. Представленная в данной работе реализация с использованием CUDA анализирует тот же файл за 306 секунд.

При этом интерфейс программирования приложений CUDA дает возможность применения данного метода на наибольшем количестве устройств с видеокартами.

Разработанный программный комплекс был апробирован на крысах и может быть непосредственно применен к другим биологическим сигналам. Взяв во внимание различия между мозгом крысы и человека, есть надежда, что метод может быть адаптирован к анализу данных ЭЭГ человека.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках финансовой поддержки Российского научного фонда (проект 22-72-10061).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Feyissa, A.M. Adult EEG / A.M. Feyissa, W.O. Tatum // Handbook of clinical neurology. – 2019. – Vol. 160. – P. 103-124.
- [2] Adeli, H. Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform / H. Adeli, Z. Zhou, N. Dadmehr // Journal of neuroscience methods. – 2003. – Vol. 123. – №. 1. – P. 69-87.
- [3] Hramov, A.E. Wavelets in neuroscience. / A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, Vol.A. Makarov, A.N. Pavlov, E. Sitnikova – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [4] Abramovich, F. Wavelet analysis and its statistical applications / F. Abramovich, T.C. Bailey, T. Sapatinas // Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician). – 2000. – Vol. 49(1). – P. 1-29.
- [5] Pavlov, A.N. Extended detrended fluctuation analysis of sound-induced changes in brain electrical activity / A.N. Pavlov, A.I. Dubrovsky, A.A. Koronovskii Jr, O.N. Pavlova, O.Vol. Semyachkina-Glushkovskaya, J. Kurths // Chaos, Solitons & Fractals. – 2020. – Vol. 139.
- [6] Pavlov, A.N. Extended detrended fluctuation analysis of electroencephalograms signals during sleep and the opening of the blood–brain barrier / A.N. Pavlov, A.I. Dubrovsky, A.A. Koronovskii Jr, O.N. Pavlova, O.Vol. Semyachkina-Glushkovskaya, J. Kurths // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2020. – Vol. 30(7). – P. 073138.
- [7] Milikovskiy, D.Z. Paroxysmal slow cortical activity in Alzheimer’s disease and epilepsy is associated with blood-brain barrier dysfunction / D.Z. Milikovskiy, J. Ofer, Vol.Vol. Senatorov Jr, A.R. Friedman, O. Prager, L. Sheintuch, A. Friedman // Science Translational Medicine. – 2019. – Vol. 11(521). – P. eaaw8954.
- [8] Núñez, P. Characterization of the dynamic behavior of neural activity in Alzheimer’s disease: Exploring the non-stationarity and recurrence structure of EEG resting-state activity / P. Núñez, J. Poza, C. Gómez, Vol. Barroso-García, A. Maturana-Candelas, M.A. Tola-Arribas, R. Hornero // Journal of Neural Engineering. – 2020. – Vol. 17(1). – P. 016071.
- [9] Gould, R.W. Modulation of arousal and sleep/wake architecture by M1 PAM VU0453595 across young and aged rodents and nonhuman primates / R.W. Gould, J.K. Russell, M.T. Nedelcovych, M. Bubser, A.L. Blobaum, T.M. Bridges, C.K. Jones // Neuropsychopharmacology. – 2020. – Vol. 45(13). – P. 2219-2228.
- [10] Ciric, J. Age-related disorders of sleep and motor control in the rat models of functionally distinct cholinergic neuropathology / J. Ciric, K. Lazic, J. Petrovic, A. Kalauzi, J. Saponjic // Behavioural Brain Research. – 2016. – Vol. 301. – P. 273-286.
- [11] Bazilio D.S. Cardiovascular and respiratory profiles during the sleep–wake cycle of rats previously submitted to chronic intermittent hypoxia / D.S. Bazilio, L.G. Bonagamba, D.J. Moraes, B.H. Machado // Experimental Physiology. – 2019. – Vol. 104(9). – P. 1408-1419.
- [12] Liu, Y. Propagations of spontaneous brain activity in awake rats / Y. Liu, N. Zhang // Neuroimage. – 2019. – Vol. 202. – P. 116176.
- [13] Halász P. The nature of arousal in sleep / P. Halász, M. Terzano, L. Parrino, R. Bódizs // Journal of sleep research. – 2004. – Vol. 13(1). – P. 1-23.
- [14] Руннова, А.Е. Программа ЭВМ на базе вейвлетного анализа предоставляющая возможность оценки основных характерных ритмов активности головного мозга (альфа-, бета-, гамма-ритмы) / А.Е. Руннова, А.Е. Храмов, М.О. Журавлёв. – 2017.