

Метод восстановления связей между отделами головного мозга человека в процессе обучения по данным электроэнцефалограммы

Н. С. Фролов^{1,2,*}, Д. В. Кирсанов¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
Научно-образовательный центр «Системы искусственного интеллекта и нейротехнологии»
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83

(Статья поступила 30.06.2018; Подписана в печать 10.09.2018)

В настоящей работе описаны результаты применения математического метода по анализу многомерных временных рядов для выявления изменения функциональных связей в головном мозге человека, возникающих при просмотре обучающих видео-лекций. Данный математический метод основан на установлении взаимной зависимости процессов с точки зрения их условной вероятности и известен в литературе как рекуррентная мера зависимости (Recurrent Measure of Dependence). Многоканальные сигналы электрической активности головного мозга человека получены в ходе серии нейрофизиологических экспериментов по регистрации электроэнцефалограмм (ЭЭГ). С применением математической методики были показаны качественные изменения динамики головного мозга в процессе обучения по сравнению с фоновой активностью, вызванные активацией процессов восприятия и обработки внешней визуальной информации.

PACS: 02.50.Sk; 05.45.Tr УДК: 530.182

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, ЭЭГ, головной мозг, функциональные связи, восстановление связей, обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Понимание устройства головного мозга и его когнитивных функций, составляющих основу человеческого мышления, является одной из быстро развивающихся и горячих тем в современной науке. В ответ на это, в обществе возникает потребность в использовании полученных новых теоретических знаний на практике для повышения качества образования [1]. Естественным образом, эти научные направления развиваются самосогласованно и представляют широкие возможности для модификации образовательного процесса с ориентиром на последние тенденции из области нейро- и когнитивной науки [2].

В первую очередь, представляется интересным проведение исследований, направленных на выявление форм и условий обучения, при которых усвоение и восприятие новой информации человеком является оптимальным. Обзор современной литературы показывает интерес мирового научного сообщества к данной проблематике. Особое внимание уделяется исследованиям на стыке нейронауки, педагогики и психологии, направленным на поиск новых технических средств и методов для модернизации образовательного процесса на качественном уровне. Так, ранее в рамках нейрофизиологического исследования по записи электроэнцефалограмм (ЭЭГ) были изучены влияние музыкального образования на функционирование нейронной сети головного мозга [3]. Также, в рамках ЭЭГ исследова-

ний, была показана эффективность подкастинга, как нового технического средства для образовательного процесса [4].

На наш взгляд, эффективное решение подобных задач достигается при применении междисциплинарных методов и подходов, объединяющих такие научные направления как нейро- и когнитивная наука, статистическая физика и нелинейная динамика. С этих позиций, нелинейная динамика и статистическая физика позволяют развить и расширить математический аппарат методов обработки большого объема данных, получаемых в ходе нейрофизиологических исследований, и выявить ранее неизвестные особенности относительно динамики нейронной сети головного мозга. Широкое применение математических методов направлено на восстановление структуры функциональных связей между отделами головного мозга в процессе различных типов его активности [5]. Среди наиболее известных методов стоит выделить установление причинности по Грейнджеру [6], оценка нелинейных ассоциаций [7] и вейвлетной бикогерентности [8].

В настоящей работе мы применяем новый подход к анализу многомерных данных ЭЭГ, полученных в ходе регистрации электрического сигнала коры головного мозга человека при просмотре обучающих видеоматериалов, на основе нелинейно-динамического представления процессов, описываемых временными рядами. Кроме того, показана эффективность использования данного подхода для анализа именно нейрофизиологических данных. В литературе данный метод известен как рекуррентная мера зависимости (Recurrent Measure of Dependence [9]) и опирается на установление взаимной зависимости процессов с точки зрения их условной вероятности. С помощью данного метода

*E-mail: phrolovns@gmail.com

сигналы многоканальной ЭЭГ, регистрируемые в разных областях головного мозга, сравниваются попарно. В результате удается установить связаны ли процессы в различных зонах коры мозга, а также выявить интенсивность связи и оценить временную задержку.

1. МЕТОД ОБРАБОТКИ ЭЭГ ДАННЫХ

Метод заключается в следующем. По имеющимся исходным сигналам, описывающим процессы X и Y , восстанавливаются траектории в фазовом пространстве $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ и $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ соответственно. Для каждой траектории рассчитываются рекуррентные матрицы:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,j}^X &= H(\varepsilon - |x_i - x_j|), \\ \mathbf{R}_{i,j}^Y &= H(\varepsilon - |y_i - y_j|), \end{aligned} \quad (1)$$

где $H(\bullet)$ — функция Хевисайда, а ε — размер рекуррентной области фазового пространства. На основе полученных матриц вычисляются вероятность того, что событие X принимает значение x_i как $P^X(x_i) = 1/N \sum_{j=1}^N \mathbf{R}_{i,j}^X$, и аналогично для события Y : $P^Y(y_i) = 1/N \sum_{j=1}^N \mathbf{R}_{i,j}^Y$.

Также, считается взаимная рекуррентная матрица:

$$\mathbf{J}\mathbf{R}_{i,j} = \mathbf{R}_{i,j}^X \mathbf{R}_{i,j}^Y, \quad (2)$$

и на ее основе вычисляется условная вероятность того, что событие X принимает значение x_i при том, что событие Y принимает значение y_i как $P^{XY}(x_i, y_i) = 1/N \sum_{j=1}^N \mathbf{J}\mathbf{R}_{i,j}$. Чтобы определить насколько независимыми являются события X и Y в момент времени i , вычисляется величина рекуррентной меры зависимости:

$$RMD_i = P^{XY}(x_i, y_i) / (P^X(x_i)P^Y(y_i)). \quad (3)$$

Расчет рекуррентной меры зависимости позволяет провести анализ связи с учетом задержки τ путем сдвига одного из временных рядов на необходимое количество единиц времени. В этом случае:

$$RMD(\tau) = \log_2 \left(\frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} RMD_i(\tau) \right). \quad (4)$$

где $N' = N - \tau$, а $RMD(\tau)$ подразумевает оценку величины RMD с учетом смещения сигнала Y на τ . В этом случае, для независимых процессов будем иметь $RMD = 0$, в то время как ненулевое значение RMD при $\tau > 0$ говорит о влиянии X на Y , и наоборот для $\tau < 0$.

При анализе экспериментальных данных введенная мера RMD может принимать такие значения, при которых мы не можем однозначно судить о зависимости двух исследуемых событий. В отличие от числен-

ных расчетов, когда в качестве теста мы можем сравнить полученные значения со случаем двух несвязанных систем, в случае «пассивного» эксперимента возможность провести подобное тестирование отсутствует. В такой ситуации важно удостовериться в корректности результата с использованием статистических тестов на основе суррогатных данных, полученных с помощью специального алгоритма «суррогатов-близнецов» из оригинальных рассматриваемых временных рядов [10], и опровергнуть соответствующую нулевую гипотезу. Нулевая гипотеза для набора сгенерированных данных гласит, что суррогатная траектория системы в фазовом пространстве является независимой копией системы, соответствующей другим начальным условиям. Таким образом, чтобы проверить зависимость между событиями X и Y необходимо создать набор из нескольких суррогатных данных, полученных в ходе преобразования временного ряда события Y ; построить распределения значений RMD , посчитанных для каждого из суррогатных рядов; определить доверительный интервал зависимости двух событий как 95 перцентиль полученного распределения (значения RMD , лежащие выше доверительного интервала говорят о наличии связи между событиями).

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для анализа функциональных связей в головном мозге человека при просмотре обучающих видеозаписей был проведен нейрофизиологический эксперимент по записи ЭЭГ с участием трех здоровых студентов старшего курса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина, Ю. А. в возрасте 20–22 года. С целью соблюдения большей однородности выборки для участия в эксперименте были отобраны студенты с высоким средним баллом, проявляющие склонность к обучению. Экспериментальные работы проводились в первой половине дня с соблюдением оптимального психофизиологического состояния испытуемых. Схематическое представление дизайна эксперимента приведено на рис. 1. На всем протяжении эксперимента для испытуемого были созданы следующие условия: доброволец сидел в кресле в удобном положении на комфортном расстоянии от экрана монитора. В ходе одной сессии эксперимента каждому испытуемому на экране монитора демонстрировались обучающие видео-ролики длительностью 98–250 с с интервалом в 60 с. Перед началом активной фазы эксперимента, а также по ее окончании осуществлялась запись фоновой активности головного мозга испытуемых в течение 120 с. В ходе последующей математической обработки сигналов и интерпретации результатов активность мозга добровольца во время просмотра обучающего видео-контента сравнивалась с фоновой активностью в расслабленном состоянии. Отметим, что в ходе работ использовался электроэнцефалограф-регистратор производства компании Медиком-МТД, производящий

запись многоканального сигнала ЭЭГ в стандартной расстановке 10–10. Отметим, что экспериментальные исследования проводились в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации, а также одобрены комиссией по этике Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

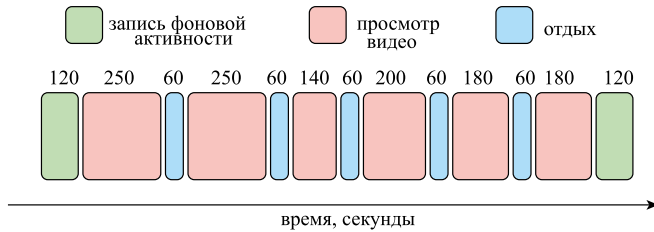


Рис. 1: Дизайн проведенного нейрофизиологического эксперимента. Блоки разного цвета представляют разные этапы эксперимента: запись фоновой активности; просмотр обучающего видео; отдых. Цифры над блоками отражают длительность каждого этапа в секундах

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам экспериментальных исследований, описанных в предыдущем разделе, был проведен анализ функциональных связей между отделами головного мозга испытуемых во время просмотра обучающих видеозаписей с помощью математического метода, описанного в разделе 1.

На рис. 2 приведено сопоставление результатов, полученных в ходе выявления функциональных связей в головном мозге испытуемых, для случаев фоновой активности и просмотра обучающих видеозаписей. Представленные результаты усреднены по соответствующим этапам экспериментальной сессии. Из рисунков 2,а,в видно, что в режиме фоновой активности человека наиболее сильная связь устанавливается между отделами мозга, расположенными в затылочной и теменной долях левого полушария, а также частично в лобной доле. По сравнению с фоновой активностью, при просмотре испытуемым обучающих видеозаписей, предложенная математическая методика для обработки многоканальных ЭЭГ сигналов выявляет заметное усиление связей в правом полушарии (смотрите рисунок 2,б,г). Видно, что наиболее сильно по сравнению с фоновой активностью становятся связаны отделы теменной и затылочной части. При этом, заметно формирование хаба — узла с наибольшим числом связей. В качестве хаба данной сетевой структуры выступает канал О2, имеющий 4 значимых связи (выделен красным на рисунке 2,г). Формирование хаба в затылочной области, тесно связанного с каналами теменной доли, при просмотре обучающих видео-роликов означает активацию процессов, связанных с восприятием и обработкой внешней визуальной информации, а так-

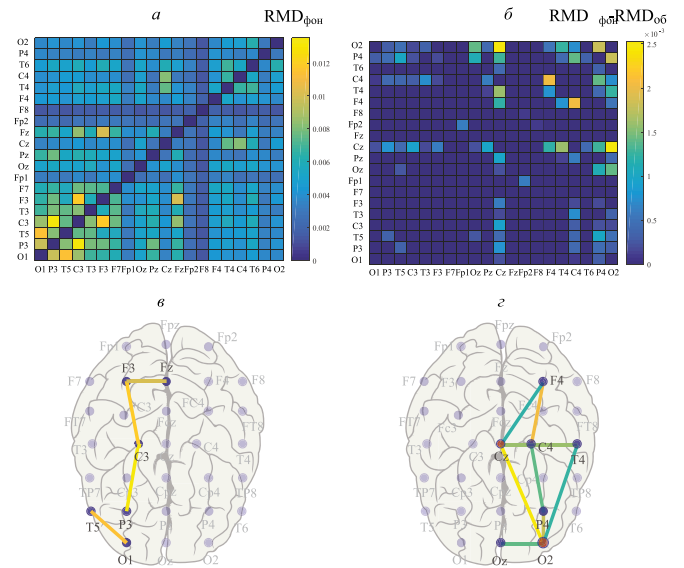


Рис. 2: а — Матрица связей между отделами головного мозга во время фоновой активности испытуемого; б — матрица усиления связей между отделами головного мозга человека при просмотре обучающих видеороликов; в — визуализация наиболее значимых связей, устанавливающихся в фоновом режиме; г — визуализация связей между отделами головного, наиболее заметно усилившихся при просмотре обучающих видеозаписей

же повышением на концентрации при усвоении обучающего материала. Несмотря на то, что полученные результаты согласуются с хорошо известными на сегодняшний день представлениями о работе человеческого, их первоочередная значимость заключается в непосредственной локализации областей головного мозга, связанных с восприятием и анализом новой визуальной информации. Эти знания, в свою очередь, будут полезны при разработке носимых устройств, интерфейсов мозг-компьютер, для оценки степени концентрации внимания на усвоении образовательного контента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был применен новый математической подход, известный в литературе как рекуррентная мера зависимости (англ. Recurrent Measure of Dependence), для анализа установления взаимосвязей в головном мозге испытуемых по многомерным данным ЭЭГ во время просмотра участниками эксперимента обучающего видео-контента. Нейрофизиологический сигнал электроэнцефалограммы был получен в ходе регистрации электрической активности коры головного мозга испытуемых при просмотре обучающих видео-материалов. С помощью проведенного анализа было установлено, что просмотр обучающих видеоматериалов вызывает формирование и усиление функциональных связей между отделами теменной и заты-

лочной доли правого полушария головного мозга по сравнению с фоновой активностью головного мозга, зарегистрированной в период отдыха. При этом затылочный канал О2 играет роль хаба в реконструированной сетевой структуре и связан с большинством остальных каналов, чья активация оказывается наиболее выраженной в процессе восприятия внешней визуальной информации. Полученные структурные свойства нейронной сети коры головного мозга в процессе обучения отражают качественные изменения динамики головного мозга в процессе обучения по сравнению с фоновой активностью — в процессе просмотра видео-лекций у испытуемых активизируются отделы обработки и вос-

приятия визуальной информации, а наблюдается изменения, свойственные усилению концентрации внимания.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук (проект МК-5850.2018.2) и ведущих научных школ РФ (проект НШ-2737.2018.2).

-
- [1] *Goswami U.* Nature reviews neuroscience. 2006. **7**, N 5. P. 406.
- [2] *Meltzer L.* Executive function in education: From theory to practice. New York: Guilford Publications, 2018.
- [3] *Altenmüller E., Gruhn W., Parlitz D., Liebert G.* International journal of music education. 2000. **1**. P. 47.
- [4] *Bensalem-Owen M., Chau D. F., Sardam S. C., Fahy B. G.* Neurology. 2011. **77**, N 8. P. e42.
- [5] *Friston K. J.* Brain Connectivity. 2011. **1**, N 1. P. 13.
- [6] *Seth A. K., Barrett A. B., Barnett L.* Journal of Neuroscience. 2015. **35**, N 8. P. 3293.
- [7] *da Silva F. L., Pijn J. P., Boeijinga P.* Brain topography. 1989. **2**, N. 1-2. P. 9.
- [8] *Hramov A. E., Koronovskii A. A., Makarov V. A., Pavlov A. N., Sitnikova E.* Wavelets in neuroscience. Berlin: Springer, 2016.
- [9] *Goswami B., Marwan N., Feulner G., Kurths J.* The European Physical Journal Special Topics. 2013. **222**, N. 3-4. P. 861.
- [10] *Thiel M., Romano M. C., Kurths J., Rolfs M., Kliegl R.* Phil. Trans. R. Soc. A. 2008. **366**, P. 545.

An approach for links reconstruction in human brain during a learning process using electroencephalography data

N. S. Frolov^{1,2,a}, D. V. Kirsanov¹

¹Research and education center «Artificial Intelligence Systems and Neurotechnology», Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov 410054, Russia

²Saratov State University, Saratov 410012, Russia
E-mail: ^aphroloovns@gmail.com

In this paper, we describe the results of application a mathematical method to analyze multidimensional time series to identify changes in functional connections in the human brain that occur while viewing educational video lectures. This mathematical method is based on the establishment of mutual dependence of processes in terms of their conditional probability and is known in the literature as a Recurrent Measure of Dependence. Multichannel signals of electrical activity of the human brain were obtained during a series of neurophysiological experiments on the registration of electroencephalograms (EEG). With the application of a mathematical technique, qualitative changes in the dynamics of the brain were shown in the learning process in comparison with the background activity, caused by activation of the processes of perception and processing of external visual information.

PACS: 02.50.Sk; 05.45.Tp

Keywords: electroencephalography, EEG, human brain, functional connectivity, links reconstruction, learning process.

Received 30 June 2018.

Сведения об авторах

1. Фролов Никита Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (452) 99-88-32, e-mail: phroloovns@gmail.com.
2. Кирсанов Даниил Владимирович — студент, лаборант-исследователь; тел.: (452) 99-88-32, e-mail: dankirsdot@gmail.com.