

Пространственно-временной скейлинг зрительно-вызванных нейромагнитных сигналов человека

В.А. Юнусов
Казанский (Приволжский)
федеральный университет
Казань, Россия
valentin.yunusov@gmail.com

С.А. Демин
Казанский (Приволжский)
федеральный университет
Казань, Россия
serge_demin@mail.ru

И.А. Русанова
Казанский (Приволжский)
федеральный университет
Казань, Россия
irusanova@yandex.ru

А.В. Минкин
Казанский (Приволжский)
федеральный университет
Казань, Россия
minkins@yandex.ru

А.А. Еленёв
Казанский (Приволжский)
федеральный университет
Казань, Россия
a.elenev6345@gmail.com

Аннотация—В настоящей работе проводится фрактальный анализ зрительно-вызванных нейромагнитных откликов коры головного мозга человека в ответ на мерцающие световые стимулы разных цветовых комбинаций (красно-голубой, красно-зеленый, голубой-зеленой). В исследовании используются сигналы магнитоэнцефалограмм здоровых испытуемых, фиксируемые до и после воздействия стимулов. Для расчета фрактальной размерности D используется модифицированный метод Хигучи. Пространственно-временной скейлинг демонстрируется на основе топографических карт и гистограмм. Показано, что включение световых стимулов приводит к значительной реакции со стороны практически всех отделов коры головного человека. Наиболее значительное изменение самоподобных свойств исследуемых сигналов наблюдается для лобной и затылочной областей. Полученные результаты будут представлять интерес для наук о данных, нейрофизиологии и когнитивной психологии.

Ключевые слова— науки о данных, анализ временных сигналов, фрактальные особенности, нейромагнитные отклики, мерцающие световые стимулы, когнитивные возможности, диагностика.

1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 40-х годов 20 века в человеческой науке происходит эволюция наук о сложности согласно пяти интеллектуальным традициям: теории динамических систем, общей теории систем, кибернетике, искусственному интеллекту и теории сложных систем. Благодаря взаимному проникновению этих направлений и широкому распространению полученных результатов в научном сообществе становится возможным изучение уникальных свойств сложных как физических, так и нефизических систем. Настоящим триумфом наук о сложности стало присуждение в 2021 году Нобелевской премии в области физики троим ученым: Сюкуро Манабэ, Клаусу Хассельману и Джордجو Паризи «...за фундаментальный вклад в наше понимание сложных физических систем». В работах Манабэ приводится математическое описание сложных изменчивых систем на примере исследования климата Земли [1], в то время как Хассельману удалось использовать стохастические методы для обнаружения связи между постоянно

меняющимися погодными условиями и более устойчивым климатом Земли [2]. Паризи удалось применить статистические методы и модели для установления взаимосвязей в хаосе и флуктуациях в сложных физических системах от атомарных до планетарных масштабов [3].

Анализируя научную литературу, можно выделить такие свойства сложных систем как сложность, открытость, нелинейность, адаптивность, эмерджентность, самоорганизацию и критические переходы [4]. Под сложной системой понимается объект, состоящий из значительного числа взаимодействующих элементов. Взаимодействие между частями целого приводит к перечисленным уникальным свойствам, которые делают системы «сложными» для изучения классическими методами. Значительный прогресс в области вычислительной техники и экспериментального регистрирующего оборудования способствовал привлечению к изучению свойств сложных систем наук о данных. Анализ временных сигналов численными методами позволяет с большей точностью изучить особенности динамических взаимосвязей, которые выстраиваются в ходе эволюции сложных систем.

2. ФРАКТАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НЕЙРОМАГНИТНЫХ ОТКЛИКОВ ЧЕЛОВЕКА

Ранее с целью диагностики фоточувствительной эпилепсии (ФЧЭ) в работах авторов [5, 6] были представлены результаты исследования магнитоэнцефалограмм (МЭГ) коры головного человека в ответ на мерцающие световые стимулы разных цветовых комбинаций. В дополнение к установленным диагностическим критериям в работе [7] изучены фрактальные закономерности сигналов МЭГ при ФЧЭ.

В настоящей работе мы развиваем предложенный ранее подход к расчету фрактальной размерности D для анализа МЭГ сигналов здоровых испытуемых в ответ на красно-голубой, красно-зеленый и голубой-зеленый стимулы, основанный на модифицированном методе Хигучи. Экспериментальные данные были зафиксированы 61 СКВИДами (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик), расположенными на всей поверхности головы человека.

Примерные схемы расположения датчиков представлены на Рис. 1, Рис. 2.

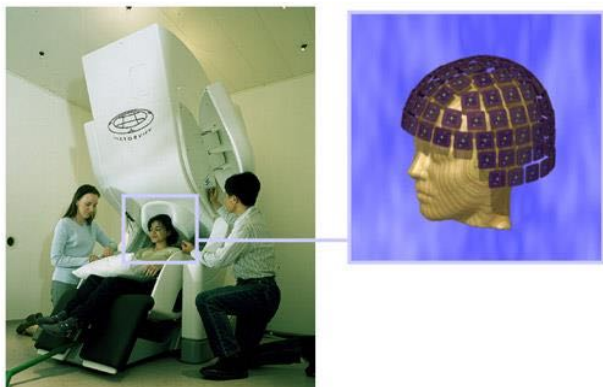


Рис. 1. Регистрация нейромагнитных откликов человека и примерное расположение СКВИДов на поверхности головы

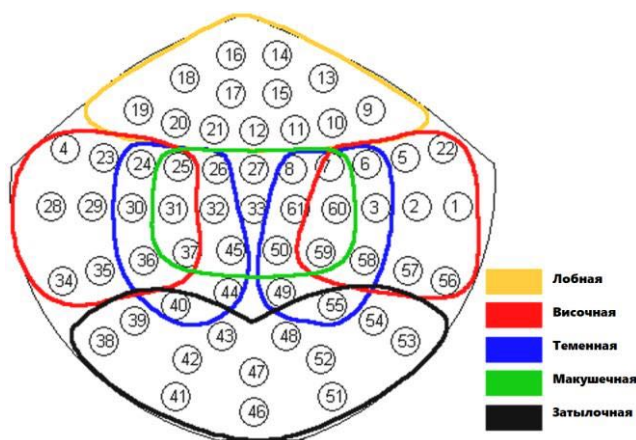


Рис.2. Локализация СКВИДов на поверхности головы человека

Регистрация сигналов выполнялась для семи мужчин и двух женщин в возрасте от 22 до 27 лет [8]. Ни у кого из испытуемых не были установлены какие-то неврологические или другие отклонения в работе головного мозга. Световые стимулы подавались на экран при помощи двух проекторов. Первые 200 измерений фиксировался контрольный сигнал: испытуемые смотрели на экран без подачи стимула, последующие 201–1095 измерений выполнялись при подаче стимула.

Результаты исследования представлены в виде топографических карт, где приведены значения показателя D для каждой локализации СКВИДа, а также в виде гистограмм, для которых рассчитаны усредненные значения D для отдельных областей коры головного мозга человека.

Результаты настоящего исследования позволили установить, каким образом меняется фрактальная структура МЭГ сигналов в ответ на разные световые стимулы. В частности, подача мерцающего стимула, то есть переход от спонтанных к индуцированным или вызванным нейромагнитным откликам, приводит к изменению пространственно-временного скейлинга сигналов в большинстве областей коры головного мозга здоровых испытуемых. Наибольшая реакция выявлена для лобной и затылочной областей.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение эффектов пространственно-временной инвариантности осуществляется на основе фрактальных методов, которые позволяют определить различные значения и распределения фрактальной и мультифрактальной размерностей, степенные законы с целочисленными и дробными показателями, меры сложности временных сигналов [9].

В настоящей работе проводится фрактальный анализ сигналов МЭГ человека при воздействии мерцающими световыми стимулами разных цветовых комбинаций. В ходе исследования установлены области коры головного мозга с наибольшей реакцией на внешнее воздействие. Работа будет интересна с точки зрения биофизики восприятия визуальной информации и развития когнитивных возможностей человека. Кроме того, результаты настоящей работы будут полезны для изучения механизмов провоцирования приступов при фоточувствительной эпилепсии [5–8, 10].

Дальнейшие исследования самоподобной структуры МЭГ сигналов будут проводиться путем их комплексного анализа с привлечением других фрактальных показателей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Manabe, S. The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the climate of a General Circulation Model / S. Manabe, R.T. Wetherald // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1975. – Vol. 32. – P. 3-15.
- [2] Hasselmann, K. Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change / K. Hasselmann // *Climate Dynamics*. – 1997. – Vol. 13. – P. 601-611.
- [3] Altarelli, G. Asymptotic freedom in parton language / G. Altarelli, G. Parisi // *Nuclear Physics B*. – 1977. – Vol. 126(2). – P. 298-318.
- [4] Weaver, W. Science and Complexity / W. Weaver // *American Scientist*. – 1948. – Vol. 36(4). – P. 536-44.
- [5] Panishev, O.Y. Cross-correlation markers in stochastic dynamics of complex systems / O.Y. Panishev, S.A. Demin, J. Bhattacharya // *Physica A*. – 2010. – Vol. 389. – P. 4958-4969.
- [6] Timashev, S.F. Frequency and Phase Synchronization in Neuromagnetic Cortical Responses to Flickering-Color Stimuli / S.F. Timashev, Y.S. Polyakov, R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Y. Panishev, S. Shimojo, J. Bhattacharya // *Laser Physics*. – 2010. – Vol. 20(3). – P. 604-617.
- [7] Panishev, O.Y. Studying Properties of Abnormal Human Brain Activity in Photosensitive Epilepsy Caused by Light Stimulation / O. Y. Panishev, S.A. Demin, I.A. Rusanova // *Biomedical Engineering*. – 2015. – Vol. 49(4). – P. 236-239.
- [8] Bhattacharya, J. Nonlinear dynamics of evoked neuromagnetic responses signifies potential defensive mechanisms against photosensitivity / J. Bhattacharya, K. Watanabe, S. Shimojo // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2004. – Vol. 14(8). – P. 2701-2720.
- [9] Bhagat, M. Investigating Neuromagnetic Brain Responses against Chromatic Flickering Stimuli by Wavelet Entropies / M. Bhagat, C. Bhushan, G. Saha, S. Shimjo, K. Watanabe, J. Bhattacharya // *PLoS One*. – 2009. – Vol. 4. – P. e7173.
- [10] Poleon, S. Photosensitivity in generalized epilepsies / S. Poleon, J.P. Szaflarski // *Epilepsy & Behavior*. – 2017. – Vol. 68. – P. 225-233.