

# Анализ эффектов синхронизации нейромагнитных откликов человека в ответ на мерцающие световые стимулы

Д.Э. Аверкиев  
Институт физики  
Казанский федеральный  
университет  
Казань, Россия  
aver263@gmail.com

О.Ю. Панищев  
Институт физики  
Казанский федеральный  
университет  
Казань, Россия  
opanishev@gmail.com

С.А. Демин  
Институт физики  
Казанский федеральный  
университет  
Казань, Россия  
sergey.demin@kpfu.ru

**Аннотация**—В настоящем исследовании на основе формализма функций памяти проводится кросс-корреляционный анализ биомедицинских данных сложных систем живой природы. Изучены эффекты синхронизации и статистической памяти в динамике нейромагнитных откликов здоровых испытуемых в ответ на мерцающие световые стимулы (красно-синий, сине-зеленый, красно-зеленый). Мы показываем, что даже в случае высокой индивидуальности исследуемых магнитоэнцефалограмм можно установить как меняется характер взаимодействия между определенными областями коры головного мозга для каждого субъекта при разных цветовых комбинациях света. Изменения также обнаружены для фазовых портретов и спектрального поведения временных сигналов. Полученные результаты будут представлять интерес для когнитивной психологии, нейрофизиологии, а также поиска диагностических критериев неврологических заболеваний, например, фоточувствительной эпилепсии.

**Ключевые слова**—науки о данных, живые системы, анализ временных сигналов, корреляции, эффекты синхронизации, эффекты статистической памяти, нейромагнитные отклики, мерцающие световые стимулы, индивидуальные особенности.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Свет и другие внешние факторы могут оказывать существенное влияние на биоэлектрическую мозговую активность человека. Для обнаружения и анализа изменений в определенных областях коры головного мозга необходимо использовать экспериментальные данные, фиксируемые современным оборудованием. Распространённые методы исследования активности мозга – это электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и магнитоэнцефалограммы (МЭГ). В данной работе информация о функциональной активности мозга представлена в виде нейромагнитных сигналов, вызванных электрическими импульсами групп нейронов в ответ на внешние мерцающие световые стимулы [1].

В деятельности мозга можно установить ритмическую активность, которая зависит, в том числе, от внешнего периодического воздействия. Реакция на мерцающий световой стимул индивидуальна для каждого человека и зависит от частоты воздействия. Ранее на основе методов нелинейной динамики авторы установили, что наиболее существенная реакция в ответ на стимуляцию светом возникает в затылочной области коры головного мозга испытуемых [2].

В другом исследовании, проведенном на группе здоровых людей, авторы показали влияние светового мерцания с частотой  $\gamma$ -ритма (40 Гц) на работу мозга. При воздействии мерцания был обнаружен значительный отклик в разных участках затылочной

области. Изменения были установлены также в отдельных локальных областях, как это наблюдается у пациентов с различными заболеваниями мозга, что делает возможным применение метода в диагностике [3].

В работе [4] было показано наличие реакции мозга на чередующиеся вспышки красного и синего цветов. У большинства испытуемых наблюдалось повышение  $\alpha$ -активности в затылочной области.

Целью настоящей работы является анализ эффектов синхронизации – взаимодействия между определенными СКВИДа́ми (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик), расположенными на голове 9 здоровых испытуемых, при воздействии разными цветовыми комбинациями света (красно-синий, сине-зеленый, красно-зеленый). Анализ проводился в рамках авторского подхода к анализу биомедицинских сигналов – формализма функций памяти (ФФП).

## II. ФОРМАЛИЗМ ФУНКЦИЙ ПАМЯТИ

Функции памяти используют для поиска связей между изменениями случайных величин. Процессы, в которых присутствуют эффекты памяти, а также состояние системы зависит от начального состояния, называются немарковскими.

ФФП основан на конечно-разностном аналоге кинетических уравнений Цванцига-Мори [5]. В качестве базового образа используется нормированная кросс-корреляционная функция, ККФ (1). Она выражает связь между двумя случайными величинами  $X$  и  $Y$ . В нашем случае  $X$  и  $Y$  – последовательности значений одновременно фиксируемых МЭГ-сигналов.

ККФ связана с функциями статистической памяти цепочкой конечно-разностных уравнений (2).

$$c(t) = \frac{1}{(N-m)\sigma_x\sigma_y} \sum_{j=0}^{N-m-1} \delta x(T+j\tau)\delta y(T+(j+m)\tau), \quad (1)$$

$$t = m\tau, 1 \leq m \leq N-1,$$

$$\frac{\Delta M_{n-1}^{XY}(t)}{\Delta t} = \lambda_n^{XY} M_{n-1}^{XY}(t) - \tau \lambda_n^{XY} \sum_{j=0}^{m-1} M_n^{XY}(j\tau) M_{n-1}^{XY}(t-j\tau). \quad (2)$$

Мера статистической памяти – параметр немарковости вводится для разделения стохастических процессов на марковские и немарковские, а также для количественной оценки эффектов памяти в динамике исследуемого временного сигнала [5]. Ниже приведен частотно-зависимый случай параметра немарковости (3):

$$\varepsilon_i^{XY}(\nu) = \sqrt{\frac{\mu_{i-1}^{XY}(\nu)}{\mu_i^{XY}(\nu)}}, \quad (3)$$

где  $\mu_i^{XY}(\nu)$  – Фурье-образ или спектр мощности соответствующей функции памяти.

### III. АНАЛИЗ НЕЙРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕЛОВЕКА

Экспериментальные данные были получены в ходе международного сотрудничества [6]. Небольшая выборка данных связана с тем, что первоначальное исследование было направлено на диагностику фоточувствительной эпилепсии (ФЧЭ) при разных цветовых воздействиях [5, 6]. В настоящем тезисе мы остановимся лишь на некоторых из полученных нами результатов (для одного испытуемого, для красно-синей комбинации света), которые позволяют рассмотреть возможности ФФП-анализа в оценке эффектов синхронизации и статистической памяти МЭГ-сигналов здоровых испытуемых.

На Рис. 1 представлен фазовый портрет, составленный комбинацией ортогональных динамических переменных. Подобное представление позволяет оценить особенности пространственно-временной структуры исследуемой динамики. На фазовом портрете отчетливо различимы две структуры, связанные с периодами «до» и «после» подачи стимула.

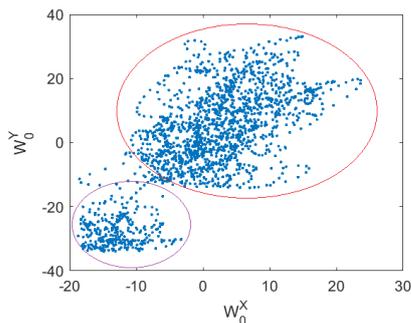


Рис. 1. Фазовый портрет, составленный комбинацией ортогональных динамических переменных для нейромагнитных сигналов мозга одного из здоровых людей (20 сенсор – лобная область, 41 сенсор – затылочная)

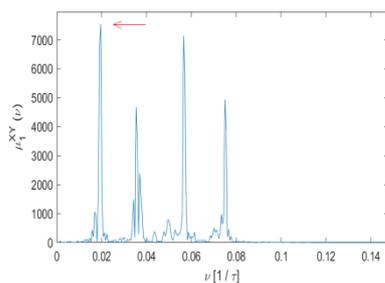


Рис. 2. Спектр мощности функции памяти первого порядка для нейромагнитных сигналов мозга здорового испытуемого (20-й и 41-й сенсоры)

На спектре мощности функции памяти первого порядка в области низких частот различимы периодические процессы:  $\alpha$ - и  $\beta$ -активность, выявляемые в лобной и затылочной областях здорового испытуемого (Рис. 2). Отметим, что спектральное поведение МЭГ-

сигналов испытуемых отличается высокой степенью индивидуальности.

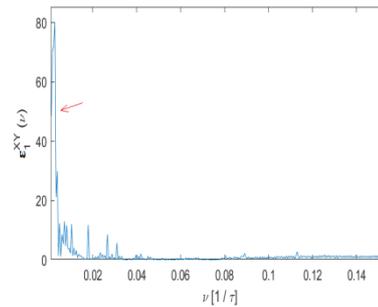


Рис. 3. Частотная зависимость первой точки параметра немарковости для динамики магнитной активности в лобной и затылочной областях здорового испытуемого

На Рис. 3 представлена частотная зависимость параметра немарковости. Значение  $\varepsilon_1^{XY}(0)$  определяет квазимарковский сценарий с кратковременными проявлениями эффектов статистической памяти.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен анализ эффектов синхронизации и статистической памяти между МЭГ-сигналами различных областей коры головного мозга здоровых испытуемых. Изучены разномасштабные структуры, обнаруженные на фазовых портретах для нейромагнитных сигналов, фиксируемых с лобной и затылочной областей. Исследованы спектральные особенности магнитоэнцефалограмм здоровых испытуемых при разных цветовых комбинациях света.

В дальнейшем предложенный метод может быть применен для поиска диагностических критериев патологической активности мозга, например, при ФЧЭ.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fernando, L. EEG and MEG: Relevance to neuroscience / L. Fernando // Journal: Neuron. – 2013. – Vol. 80(5). – P. 1112–1128.
- [2] Pisarchik, A.N. Brain noise estimation from MEG response to flickering visual stimulation / A.N. Pisarchik, P. Chholak, A.E. Hramov // Chaos Solitons and Fractals. – 2019. – Vol. 10. – P. 100005.
- [3] Zhang, Y. 40 Hz Light flicker alters human brain electroencephalography microstates and complexity implicated in brain diseases / Y. Zhang, Z. Zhang, L. Lei, H. Tong, F. Chen, S.T. Hou // Frontiers in Neuroscience. – 2021. – Vol. 15. – P. 777183.
- [4] Ohkado, H. Response of brain alpha wave to color alternating flicker stimuli / H. Ohkado, S. Nishifuji, S. Tanaka // IEEE Xplore. – 2004. – Vol. 3. – P. 2135–2140.
- [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] 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.