

Исследование динамических взаимосвязей в индуцированных сигналах биомагнитной активности головного мозга человека на основе формализма функций памяти

© Д.Э. Аверкиев, С.А. Демин, О.Ю. Панищев

Казанский федеральный университет, Казань, Россия

E-mail: aver263@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 мая 2023 г.

В окончательной редакции 30 июня 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Продемонстрированы возможности авторского метода — формализма функций памяти — в анализе динамических взаимосвязей сигналов биомагнитной активности головного мозга человека, индуцированных комбинациями красно-синего, красно-зеленого и сине-зеленого света. Проведен анализ эффектов синхронизации и статистической памяти в нейромагнитных откликах разных областей коры головного мозга группы здоровых испытуемых. Изучены фазовые портреты и спектры мощности кросс-корреляционных функций и функций памяти. Установлены области коры головного мозга с наиболее существенной ответной реакцией. Проведена количественная оценка эффектов статистической памяти в одновременно фиксируемых сигналах.

Ключевые слова: физика сложных систем, формализм функций памяти, магнитоэнцефалограммы, мерцающие стимулы, синхронизация.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56841.62A

Мозг человека является уникальной сложной системой, представляющей научный интерес для исследования протекающих в нем процессов. Среди методов регистрации нейронной активности коры головного мозга можно отметить электроэнцефалографию и магнитоэнцефалографию (МЭГ) [1]. Инструментальные методы позволяют исследовать функционирование мозга при генерации сенсорной информации, поступающей от органов чувств. Так, при воздействии звуковых стимулов установлено, что высокая индивидуальность сигналов мозга повышается при концентрации испытуемых на определенных задачах (по сравнению с состоянием покоя) [2]. Воздействие света также способно оказывать существенное влияние на ритмическую активность мозга человека. Как было показано в работе [3], более высокая активность коры головного мозга в α -диапазоне проявляется при воздействии синего света. Периодичность визуального стимула оказывает влияние на активность затылочной (в первую очередь) и в меньшей мере других областей коры головного мозга здоровых испытуемых [4].

В силу высокой пространственно-временной точности МЭГ создаются новые методы регистрации сигналов, например, с использованием магнитометра для выявления ритмов [5], а также разрабатываются подходы для анализа данных МЭГ здоровых людей, такие как метод k -средних и линейный системный анализ [6,7]. Среди методов, позволяющих проводить спектральный анализ динамики сигналов и исследовать его фрактальные характеристики, можно отметить фурье- и вейвлет-преобразования [8]. Появление новых методов исследования динамики сигналов МЭГ позволяет не только устанавливать особенности функционирования

мозга здорового человека, но и выявлять отклонения работы мозга при заболеваниях нервной системы, например шизофрении и фоточувствительной эпилепсии, с помощью анализа фазовых характеристик и ритмов коры головного мозга [9], исследования резонансных и высокочастотных компонент сигналов [10].

Цель настоящей работы заключается в изучении динамических взаимосвязей в сигналах биомагнитной активности головного мозга человека, фиксируемых сверхпроводящими квантовыми интерференционными датчиками (СКВИД) и индуцированных различными мерцающими комбинациями света: красно-синей, красно-зеленой и сине-зеленой. Экспериментальные данные активности мозга были получены в ходе международного сотрудничества [11]. В исследовании принимали участие девять здоровых добровольцев: две женщины и семь мужчин (возрастной диапазон составил от 22 до 27 лет). Во время регистрации магнитоэнцефалограмм каждый волонтер наблюдал световую комбинацию двух цветов, генерируемых видеопроекторами на специальном экране. В течение короткого времени первоначально фиксировался контрольный сигнал (без подачи стимула), после чего подавался мерцающий световой стимул. Небольшое число добровольцев связано с целью более раннего исследования, для которого осуществлялась регистрация экспериментальных данных [11]. На основе статистического анализа МЭГ-сигналов в нем выполнялся поиск диагностических критериев фоточувствительной эпилепсии.

Анализ биомедицинских данных (МЭГ-сигналов) проводится нами в рамках авторского подхода — формализма функций памяти. Подход основан на конечно-разностном аналоге кинетических уравнений

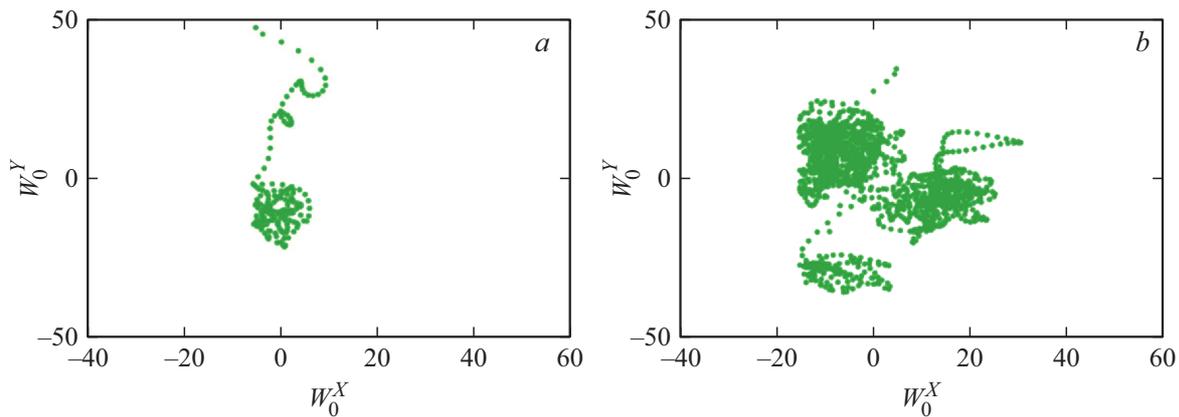


Рис. 1. Фазовые портреты, составленные одной из комбинаций ортогональных динамических переменных для сигналов мозга одного из здоровых испытуемых до (а) и после (b) воздействия сине-зеленого стимула.

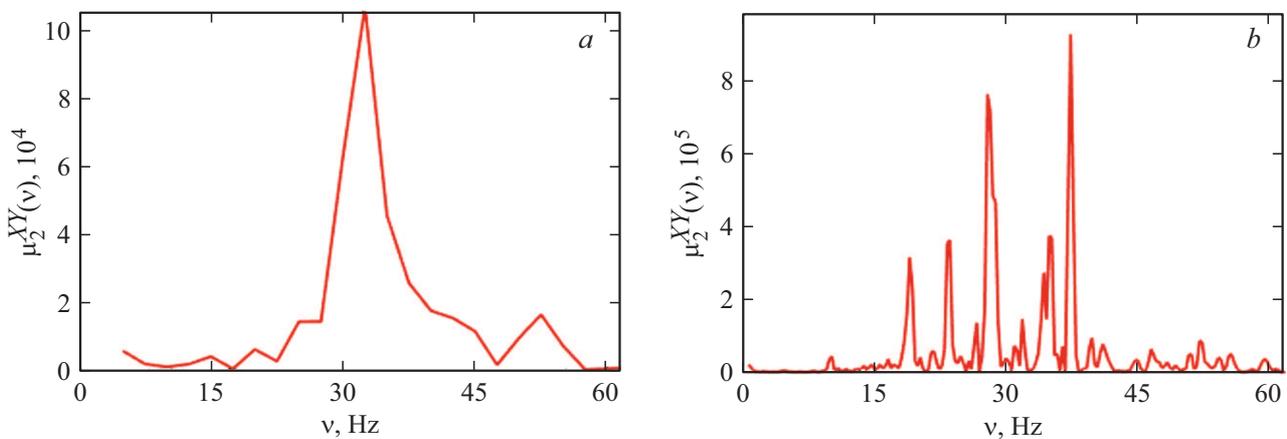


Рис. 2. Репрезентативные спектры мощности функции памяти второго порядка. Графики приведены в соответствии с условиями, представленными в подписи к рис. 1.

Цванцига–Мори [12–16]. В рамках автокорреляционно-го подхода экспериментально фиксируемый МЭГ-сигнал рассматривается в виде многомерного вектора состояния, подчиняющегося уравнению движения, записанному в дискретном виде. Использование проекционной техники Цванцига–Мори и процедуры ортогонализации Грамма–Шмидта позволяет провести сокращение в описании [14,15].

В настоящей работе используется обобщение формализма функций памяти на случай перекрестных корреляций [12,13,16], в котором нормированная кросс-корреляционная функция связана с функциями статистической памяти. Вычисляемые кросс-корреляционные характеристики позволяют исследовать динамические взаимосвязи между одновременно фиксируемыми МЭГ-сигналами в разных областях коры головного мозга человека при воздействии мерцающими световыми стимулами.

Информация о пространственно-временной структуре анализируемых сигналов (в качестве примера выбрана пара сенсоров из лобной и затылочной областей) бы-

ла получена на основе фазовых портретов, составленных комбинацией ортогональных динамических переменных [12]. На рис. 1, а и b показано, как меняется пространственно-временная структура МЭГ при подаче сине-зеленого светового стимула. Можно отметить увеличение пространственных размеров фазового портрета, а также его расслоение на три неравные структуры после подачи стимула (рис. 1, b), что свидетельствует об изменении величины магнитного поля при внешних воздействиях. В случае красно-синего и красно-зеленого стимулов также были установлены особенности динамики сигналов, приводящие к увеличению пространственных размеров фазовых портретов и их стратификации, как правило, на две структуры после подачи стимула.

Анализ эффектов согласования/рассогласования МЭГ-сигналов выполнен на основе исследования спектров мощности соответствующих кросс-корреляционных функций и функций памяти [12]. На рис. 2 представлены репрезентативные спектры мощности функции памяти второго порядка до (а) и после (b) подачи сине-зеленого стимула. Для указанного стимула характерна

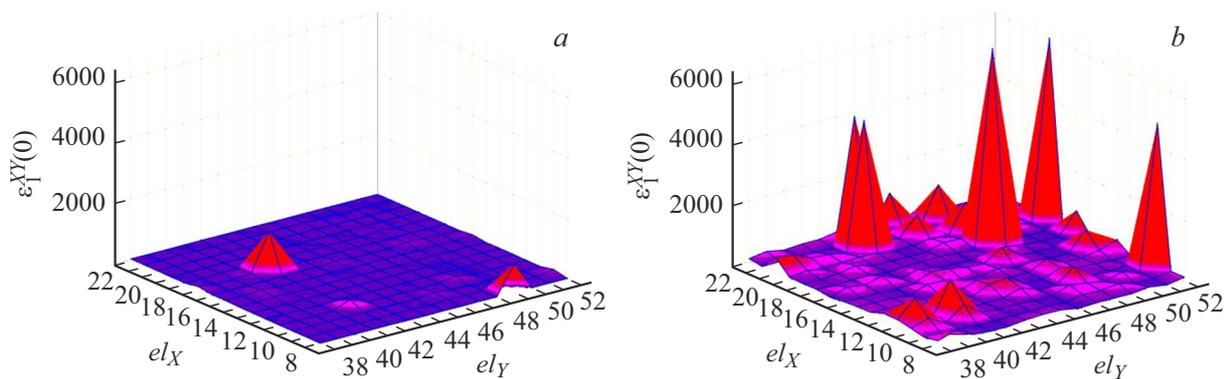


Рис. 3. Средние значения первой точки параметра немарковости на нулевой частоте для комбинаций сенсоров из лобной и затылочной областей до (а) и после (б) подачи сине-зеленого стимула.

ярко выраженная синхронизация на широкой полосе частот. Прослеживаются амплитудные пики на частотах, кратных 4 Hz, в области β - и γ -активности, а также самоподобная структура сигнала в области α -активности. При красно-синем и красно-зеленом стимулах синхронизация выявлена в β -активности и более высокочастотной γ -активности в диапазоне частот 20–40 Hz. В указанном диапазоне прослеживаются наиболее интенсивные пики на частотах, кратных 5 Hz, которые сопровождаются слабыми всплесками. В случае красно-синего стимула в спектре не была выявлена α -активность, что свидетельствует об особенностях взаимодействия анализируемой комбинации сенсоров при указанном стимуле.

Подача стимула в большинстве случаев приводит к усилению синхронизации сигналов, фиксируемых разными сенсорами. В отдельных случаях синхронизация ослабляется, что проявляется в уменьшении интенсивности пиков на спектрах мощности. При анализе комбинаций других сенсоров было установлено, что наиболее высокая степень синхронизации проявляется для сигналов, фиксируемых при подаче сине-зеленого стимула (в 73% случаев).

С помощью частотной зависимости параметра немарковости количественно оцениваются эффекты статистической памяти [12]. Большие значения данного параметра на нулевой частоте свидетельствуют о кратковременной памяти в исследуемой динамике. Малые значения указывают на наличие немарковских эффектов с проявлением сильной статистической памяти. На рис. 3 приведены средние значения первой точки параметра немарковости на нулевой частоте для отдельных комбинаций сенсоров до (а) и после подачи сине-зеленого стимула. Трехмерное представление позволяет установить, какой тип статистической памяти проявляется для комбинации сенсоров до и после подачи стимула с определенной цветовой комбинацией. При подаче сине-зеленого стимула увеличивается число областей коры головного мозга, для которых характерна марковская динамика. Мы связываем данный факт с тем, что на

фоне резонансных частот проявляется значительное число кратковременных перекрывающихся динамических процессов с малой интенсивностью. В дальнейшем при сопоставлении данных значений со значениями параметров, рассчитываемых для пациентов с патологическими отклонениями в функционировании коры головного мозга, появится возможность количественной оценки изменений эффектов статистической памяти во взаимодействиях разных областей при воздействии определенных световых стимулов.

В настоящей работе проведен анализ эффектов синхронизации и статистической памяти в нейромагнитных откликах коры головного мозга группы здоровых испытуемых. Изучены спектры мощности кросс-корреляционных функций статистической памяти при различных световых комбинациях, установлены области коры головного мозга с наиболее существенной ответной реакцией. Рассмотрена структура фазовых портретов — пространственных карт, составленных для одновременно фиксируемых МЭГ-сигналов.

Результаты данного исследования динамических взаимосвязей в сигналах биомагнитной активности мозга человека на основе формализма функций памяти будут представлять интерес для ученых, специализирующихся в области биофизики и физики сложных систем, нейрофизиологии и когнитивной психологии. В дальнейшем их можно связать с исследованиями внешних воздействий на другие функции мозга человека, такие как принятие решений, координация, эмоции, внимание, память [14].

Финансирование работы

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета („Приоритет-2030“).

Соблюдение этических стандартов

Все работы, входящие в состав исследования с участием людей, выполнены в соответствии с этическими стандартами национального Комитета по научной этике, а также с Хельсинкской декларацией 1964 г. и ее последующими дополнениями или с аналогичными этическими стандартами. Информированное добровольное согласие о цели и возможных рисках эксперимента было получено от всех участников.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L.M. Andersen, K. Jerbi, S.S. Dalal, *NeuroImage*, **215** (3), 116817 (2020). DOI: 10.1016/j.neuroimage.2020.116817
- [2] N. Colenbier, E. Sareen, T. del-Aguila Puntas, A. Griffa, G. Pellegrino, D. Mantini, D. Marinazzo, G. Arcara, E. Amico, *NeuroImage*, **271**, 120021 (2023). DOI: 10.1016/j.neuroimage.2023.120021
- [3] Y. Okamoto, S. Nakagawa, *Int. J. Psychophysiol.*, **104**, 10 (2016). DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2016.03.008
- [4] Y. Zhang, Z. Zhang, L. Lei, H. Tong, F. Chen, S.T. Hou, *Front. Neurosci.*, **15**, 777183 (2021). DOI: 10.3389/fnins.2021.777183
- [5] X. Zhang, C. Chen, M. Zhang, C. Ma, Y. Zhang, H. Wang, Q. Guo, T. Hu, Z. Liu, Y. Chang, K. Hu, X. Yang, *J. Neurosci. Meth.*, **346**, 108948 (2020). DOI: 10.1016/j.jneumeth.2020.108948
- [6] A. Capilla, L. Arana, M. Garcia-Huescar, M. Melcon, J. Gross, P. Campo, *NeuroImage*, **258**, 119373 (2022). DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.119373
- [7] O. Hauk, M. Stenroos, M.S. Treder, *NeuroImage*, **255**, 119177 (2022). DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.119177
- [8] P. Abry, H. Wendt, S. Jaffard, G. Didier, *C.R. Phys.*, **20** (5), 489 (2019). DOI: 10.1016/j.crhy.2019.08.005
- [9] D. Bai, W. Yao, S. Wang, W. Yan, J. Wang, *Biomed. Signal Process. Control*, **80** (1), 104310 (2023). DOI: 10.1016/j.bspc.2022.104310
- [10] S.A. Demin, V.A. Yunusov, S.F. Timashev, *Proc. SPIE*, **12194**, 1219402 (2022). DOI: 10.1117/12.2623095
- [11] J. Bhattacharya, K. Watanabe, S. Shimojo, *Int. J. Bifurc. Chaos*, **14** (8), 2701 (2004). DOI: 10.1142/S0218127404010850
- [12] O.Yu. Panishev, S.A. Demin, J. Bhattacharya, *Physica A*, **389** (2), 4958 (2010). DOI: 10.1016/j.physa.2010.06.026
- [13] I.G. Isaeva, O.Yu. Panishev, S.A. Demin, A.R. Ildiryakova, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697** (1), 012052 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012052
- [14] V. Yunusov, S. Demin, T. Panferova, in *2021 Int. Conf. on information technology and nanotechnology (ITNT)* (IEEE, 2021), p. 1. DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649294
- [15] S.A. Demin, R.M. Yulmetyev, O.Yu. Panishev, P. Hänggi, *Physica A*, **387** (8-9), 2100 (2008). DOI: 10.1016/j.physa.2007.12.003
- [16] S. Demin, O. Panishev, V. Yunusov, S. Timashev, in *Studies in systems, decision and control* (Springer, Cham, 2021), vol. 350, p. 27. DOI: 10.1007/978-3-030-67892-0_3