

Секция «Психофизиология, когнитивные нейронауки и искусственный интеллект»

Статистический анализ функциональной связности областей головного мозга, характеризующихся активностью с малой фазовой задержкой

Научный руководитель – Осадчий Алексей Евгеньевич

Клеева Дария Федоровна

Студент (магистр)

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Факультет социальных наук, Москва, Россия

E-mail: dkleeva@gmail.com

На текущем этапе развития нейронауки подход к изучению мозга в ракурсе коннектомики предполагает, что ключевую роль в особенностях мозговой деятельности играют функциональные связи между участками коры головного мозга. Обладая высоким временным разрешением, такие методы неинвазивной нейровизуализации, как ЭЭГ и МЭГ, в сочетании с методами локализации источников позволяют с высокой точностью оценить пространственные, временные и частотные характеристики функциональной связности, открывая возможности для более детального анализа динамики и специфики процессов, протекающих в головном мозге.

Несмотря на привлекательность и доступность, неинвазивный метод регистрации активности головного мозга сталкивается с крупным методологическим ограничением - артефактами объёмной проводимости (ОП). В результате прохождения сигнала через ткани мозга или распространения магнитного поля, порождаемого нейрональными источниками, возникает эффект линейного смещения сигналов от независимых источников таким образом, что активность одного источника регистрируется сразу несколькими сенсорами на поверхности скальпа. Это и создаёт артефакты объёмной проводимости, результатом которых являются ложные срабатывания алгоритмов детекции функциональных взаимосвязей, применяемых к непрямым неинвазивным измерениям активности мозга.

Общепринятые подходы к решению указанной проблемы включают оценку функциональной связности (ФС) с помощью мнимой части когерентности [2] или других метрик [5], которые не чувствительны к сценариям ФС, характеризующимся малой фазовой задержкой.

Нейрональные осцилляции с близкой к нулю фазовой задержкой не являются оторванным от реальности теоретическим конструктом - напротив, данные нейрофизиологических исследований свидетельствуют о том, что задержки такого порядка распространены в зрительной, теменной и моторной областях коры головного мозга [4]. Факторами, провоцирующими возникновение таких сценариев ФС, считаются общий для популяций нейронов входной сигнал, а также двунаправленное взаимодействие между популяциями. Активность с околонулевой задержкой характеризует ряд высокоуровневых интегративных процессов. Наконец, почти мгновенная синхронизация может возникать даже между пространственно изолированными структурами [1]. Исключение из анализа активности с околонулевой задержкой влечёт риск потери большого объёма информации о функциональной структуре активности мозга. Таким образом, адекватный физиологической реальности метод оценки ФС должен быть чувствителен к сценариям взаимодействия с широким диапазоном фазовых задержек.

Первым воплощением именно такого метода стал алгоритм PSICOS (Phase Shift Invariant Imaging Of Coherent Sources) [3], в основе которого лежит операция проекции, максимально подавляющей мощность компонент в векторном подпространстве действительной части кросс-спектра, относящемся к артефактам объёмной проводимости. Эффективность алгоритма и его превосходство над существующими метриками связности были продемонстрированы в рамках реалистичных симуляций и на примере анализа реальных МЭГ данных,

зарегистрированных при выполнении парадигмы ментального вращения. Учитывая, что значения меры ΦC , получаемые в результате применения описываемого алгоритма, носят ненормированный характер и зависят от мощности источников, пары несвязанных источников с высокой мощностью могут порождать ложные срабатывания.

Указанная проблема определила цель представляемого исследования - разработку статистического теста для оценки значимости получаемых с помощью алгоритма PSIICOS значений функциональной связности между парами источников. В основе разработанных нами вариаций статистического теста лежит процедура рандомизации исходных данных или кросс-спектра таким образом, что распределение мощности в пространстве источников сохраняется, а фазовые взаимодействия разрушаются. Это позволяет сформировать нулевое распределение, относительно которого статистически оцениваются наблюдаемые значения функциональной связности.

Некоторые опробованные нами традиционные способы генерации суррогатных данных не оказались результативны. Так, например, разложение сигнала на независимые компоненты и их случайные сдвиги относительно друг друга не исключают того, что в одной компоненте могут содержаться двудипольные топографии, которые не позволяют полностью уничтожить синхронную активность. Среди других методов были исследованы подходы на основе генерации авторегрессионных процессов и фазовая рандомизация на основе разложения Фурье.

Большую результативность продемонстрировала рандомизация кросс-спектра с помощью параметрического распределения Уишарта, элементы которого составляют выборочную ковариационную матрицу. Данный подход представляет собой комбинацию рандомизационного и параметрического методов генерации ноль-распределения и показал свою результативность на модельных данных.

Таким образом, в комбинации с разработанным тестом алгоритм PSIICOS, впервые предоставляющий возможность фиксировать функциональные взаимосвязи между источниками мозга, характеризующимися активностью с околонулевой фазовой задержкой, представляет собой готовый эффективный инструмент, применимый к реальным ЭЭГ-или МЭГ-данным как в рамках фундаментальных исследований функционирования мозга, так и в клинических задачах, предполагающих картирование ΦC участков коры головного мозга в диагностических целях.

Источники и литература

- 1) Matias F. S. et al. Self-organized near-zero-lag synchronization induced by spike-timing dependent plasticity in cortical populations //PloS one. – 2015. – Т. 10. – №. 10.
- 2) Nolte G. et al. Identifying true brain interaction from EEG data using the imaginary part of coherency //Clinical neurophysiology. – 2004. – Т. 115. – №. 10. – С. 2292-2307.
- 3) Ossadtchi A., Altukhov D., Jerbi K. Phase shift invariant imaging of coherent sources (PSIICOS) from MEG data //NeuroImage. – 2018. – Т. 183. – С. 950-971.
- 4) Roelfsema P. R. et al. Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas //Nature. – 1997. – Т. 385. – №. 6612. – С. 157-161.
- 5) Stam C. J., Nolte G., Daffertshofer A. Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources //Human brain mapping. – 2007. – Т. 28. – №. 11. – С. 1178-1193.