

УДК 004.89

Платформы на базе CNN для автоматизированной аннотации вызванных двигательных потенциалов: существующие системы прогнозирования моторных вызванных потенциалов

Демига Юсра¹

demigha.yousra@mail.ru

Ляпунцова Елена Вячеславовна²

lev86@bmstu.ru

SPIN-код: 3500-4160

¹ НИТУ МИСиС, Москва, Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Моторные вызванные потенциалы (МВП) являются важными нейрофизиологическими инструментами, используемыми главным образом в интраоперационном нейрофизиологическом мониторинге для оценки целостности двигательных путей во время сложных хирургических вмешательств на головном мозге. Анализ в режиме реального времени и точное описание результатов лечения имеют решающее значение для обеспечения своевременной обратной связи с хирургами, тем самым предотвращая ятрогенный неврологический дефицит. Однако традиционный анализ МВП в значительной степени опирается на ручную интерпретацию, выполняемую квалифицированными нейрофизиологами, — процесс, который по своей сути субъективен, отнимает много времени и подвержен человеческим ошибкам и усталости, особенно во время длительных хирургических вмешательств. Появление технологий глубокого обучения, в частности сверточных нейронных сетей (CNN), произвело революцию в различных областях, предложив надежные решения для автоматического извлечения признаков и распознавания образов из сложных данных. CNN продемонстрировали значительный успех в сокращении ручных усилий в различных областях применения, начиная от распознавания изображений и обработки естественного языка и заканчивая медицинской диагностикой и промышленной автоматизацией. Их способность изучать иерархические представления непосредственно на основе необработанных данных делает их исключительно подходящими для задач, связанных с анализом сложных паттернов сигналов, например обнаруживаемых в нейрофизиологических записях.

Ключевые слова: моторные вызванные потенциалы, транскраниальная магнитная стимуляция, автоматическое аннотирование, глубокое обучение, машинное обучение

CNN - based platforms for automated annotation of evoked motor potentials: current mep prediction systems

Demigha Yusra¹

demigha.yousra@mail.ru

Lyapunтова Елена Вячеславовна²

lev86@bmstu.ru

SPIN-code: 3500-4160

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia

² BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Motor evoked potential (MEP) are indispensable neurophysiological tools employed largely in intraoperative neurophysiological monitoring to assess the integrity of motor pathways in highly complex brain surgeries. Real-time evaluation and detailed explanation of treatment efficacy are indispensable to offer immediate input to surgeons and thus prevent iatrogenic neurological deficits. However, standard MEP evaluation remains highly reliant on manual interpretation by skilled neurophysiologists as a process that is fundamentally subjective, time-consuming, and liable to human fault and fatigue, especially in prolonged surgical cases. The advent of deep learning technologies, particularly convolutional neural networks (CNN), has revolutionized several fields by introducing dependable paradigms for automatic feature extraction and pattern identification from highly complex data sets. CNN has demonstrated profound capability in reducing manual efforts across a variety of applications ranging from image recognition and natural languages processing to medical diagnosis and industrial robots. Their ability to explore hierarchical representations directly from raw data makes them excellently suitable for applications involving the discrimination of complex patterns from signal patterns such as in neurophysiological recordings.

Keywords: motor evoked potentials, transcranial magnetic stimulation, automated annotation, deep learning, machine learning

Введение. Вызванные моторные потенциалы играют ключевую роль в контроле целостности двигательных путей в процессе хирургических вмешательств. Исследование и интерпретация МВП имеют первостепенное значение для их практического использования в клинической сфере. Современные технологии прогнозирования и аннотирования МВП развиваются от ручного субъективного анализа к более автоматизированным методам, основанным на данных. Традиционно клиницисты анализировали МВП вручную. Это предполагает визуальный контроль электрических сигналов для определения таких параметров, как задержка и амплитуда. Интерпретация сигналов МВП может варьироваться у разных клиницистов. Написание аннотаций вручную — трудоемкий процесс, особенно во время длительных операций. Вероятность ошибки, усталость и другие человеческие факторы могут привести к ошибкам.

Методы и материалы; результаты. Недавно в МВП-анализе были применены методы машинного и глубокого обучения для его автоматизации, устраняющие ограничения, заложенные в обычные ручные методы. Моторный вызванный потенциал с глубокой вызванной задержкой) представляет собой важный шаг вперед в данной области. ДЕЛМЭП является алгоритмом

глубокого обучения, который был специально создан для автоматизированного определения задержек МВП. Наличие специализированного инструмента, такого как ДЕЛМЭП, свидетельствует о явной тенденции к применению методов глубокого обучения для решения данной задачи.

Машинное обучение для анализа временных рядов МВП: исследования показали, что модели машинного обучения используются для анализа данных временных рядов МВП. Эти модели могут прогнозировать прогрессирование инвалидности и предоставлять другие клинически значимые данные. Это демонстрирует более широкое применение машинного обучения для извлечения значимой информации из МВП, помимо простых аннотаций.

Искусственные нейронные сети (ANN) применяются для автоматического выявления. ANN служат средством автоматического обнаружения МВП. Это критически важный этап для любой системы аннотирования, поскольку данная система должна первоначально уверенно установить наличие сигнала МВП.

Конволюционные нейронные сети (CNN) в контексте моторного декодирования: хотя они не применяются напрямую для аннотирования, находят применение в моторном декодировании на основании электроэнцефалографии (ЭЭГ). Это указывает на возможности CNN в анализе сложных неврологических сигналов, что связано с исследованием моторных вызванных потенциалов [1].

Обсуждение полученных результатов. Современный подход к анализу МВП характеризуется переходом от ручных методов к автоматизированным с акцентом на глубокое обучение. Разработка ДЕЛМЭП специально для аннотации задержки МВП является ключевым показателем этой тенденции. Наличие эффективных платформ глубокого обучения с аннотациями обеспечивает прочную основу для создания новых и усовершенствованных платформ аннотаций МВП. Следующим шагом является анализ пробелов и возможностей в этой области, чтобы предложить новое и эффективное решение на базе CNN.

На основе обзора существующих платформ CNN для автоматизации и существующих систем прогнозирования МВП выявляется несколько возможностей для разработки более эффективной платформы аннотирования моторных вызванных потенциалов (МВП) на основе CNN. Ограниченная область применения существующих автоматизированных решений МЭП: хотя ДЕЛМЭП является алгоритмом глубокого обучения для автоматической аннотации задержки МВП, возможности автоматизации все еще могут быть ограничены, хотя существуют эффективные платформы глубокого обучения с аннотациями (AIDE, PyMIC). Модели глубокого обучения, включая CNN, часто считаются «черными ящиками». В клинических условиях интерпретируемость и объяснимость автоматизированной системы аннотаций имеют решающее значение для доверия врачей и принятия. Эффективная платформа аннотаций должна быть легко интегрирована в существующие системы клинического мониторинга и электронные медицинские карты. Интраопераци-

онный мониторинг МВП требует обработки данных в режиме реального времени и надежной работы в шумных условиях [2]. Несмотря на то, что после обучения CNN могут работать быстро, обеспечение их работоспособности в режиме реального времени и устойчивости к артефактам и изменчивости между пациентами является серьезной проблемой, которую необходимо решить при разработке платформы.

Применение машинного обучения в МВП-анализе. Помимо простых аннотаций, ML-модели используются для более сложных задач, связанных с данными временных рядов МВП.

Прогностическое моделирование: исследования показали, что модели ML могут использоваться для анализа данных временных рядов МВП с целью прогнозирования прогрессирования инвалидизации или получения других клинически значимых прогностических данных, демонстрируя более широкое применение для извлечения ценной информации, выходящей за рамки базовых параметров сигнала.

Автоматическое обнаружение: искусственные нейронные сети (ANN) служат средством автоматического обнаружения МВП. Это является важной предпосылкой для любой автоматизированной системы аннотирования, поскольку система должна сначала надежно установить наличие сигнала МВП, прежде чем измерять его характеристики.

Сверточные нейронные сети (CNN), первоначально широко использовавшиеся для обработки изображений, доказали свою высокую эффективность в контексте нейрофизиологического анализа сигналов [3].

CNNS применяются для выявления локальных закономерностей и особенностей в последовательных данных и для анализа одномерных (1D) временных рядов данных МВП.

Их способность использовать широкоядерные свертки позволяет обнаруживать закономерности в больших временных интервалах, что имеет решающее значение для получения морфологии сложной формы сигнала МЕР.

CNNS непосредственно не применяются к аннотации МВП, они используются при моторном декодировании, основанном на электроэнцефалографии (ЭЭГ).

Заключение. Автоматизируя трудоемкий и субъективный процесс ручного анализа МВП, решения на базе CNN могут значительно повысить эффективность, согласованность и объективность оценки нейронных путей в режиме реального времени. В то время как существующие алгоритмы глубокого обучения, такие как ДЕЛМЭП, добились значительных успехов в автоматизации конкретных аспектов, таких как аннотация задержки, комплексная платформа должна учитывать более широкий спектр параметров МВП.

Сосредоточив внимание на этих возможностях — разработке многопараметрических архитектур CNN, использовании усовершенствованной обработки сигналов и расширении данных, изучении гибридных моделей и внедрении ориентированного на пользователя дизайна в сочетании со строгой клинической валидацией — можно создать по-настоящему эффективную

платформу аннотирования МЭП на базе CNN [4]. Такая платформа не только сократила бы ручные усилия, но и способствовала бы повышению безопасности пациентов и результатов сложных хирургических вмешательств, что ознаменовало бы значительный прогресс в области нейрофизиологического мониторинга.

Список источников

- [1] Тимофеев А.Г., Лебединская О.Г. Модель применения сверточной нейронной сети (CNN) в сочетании с долговременной памятью (LSTM) прогнозирования цены на нефть в условиях неопределенности. *Transport business in Russia*, 2022, № 2. с. 54–59. https://doi.org/10.52375/20728689_2022_2_54
- [2] Лыкасов А.А. Сверточные нейронные сети. *Современные научные исследования и инновации*. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2025/04/103236> (дата обращения 30.12.2025).
- [3] Скрипачев В.О., Гуйда М.В., Гуйда Н.В., Жуков А.О. Особенности работы сверточных нейронных сетей. *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, № 12, с. 53–51.
- [4] Яковлева Д.В., Каньшина Д.С., Подгурская М.Г., Кузнецов А.Н. и др. Прогностическая значимость моторных вызванных потенциалов при оперативных вмешательствах по поводу устранения спинального стеноза на цервикальном уровне. *Нервно-мышечные болезни*, 2020, № 3, с. 42–48.