

ОТЗЫВ

официального оппонента Щербакова Максима Владимировича на диссертационную работу Кириленко Николая Евгеньевича на тему «Метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 - Системный анализ, управление и обработка информации

Актуальность темы диссертационного исследования

Разработка интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК) является одним из наиболее перспективных направлений современных нейротехнологий. Эти системы открывают принципиально новые возможности для реабилитации пациентов с тяжелыми двигательными нарушениями, вызванными нейродегенеративными заболеваниями (например, боковым амиотрофическим склерозом), травмами спинного мозга или инсультами. Большой процент людей в мире живут с различными формами инвалидности, и для значительной части из них ИМК остается единственным каналом коммуникации с внешним миром. Кроме того, ИМК активно применяются в управлении роботизированными протезами, прототипами экзоскелетов, а также в космических программах для контроля оборудования в условиях ограниченной мобильности оператора.

Однако ключевой проблемой, препятствующей широкому внедрению ИМК, остается низкая точность классификации команд нейроуправления, которые представляют собой специфические паттерны биоэлектрической активности, регистрируемые посредством электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Сигналы ЭЭГ, являющиеся основой для неинвазивных интерфейсов, и характеризуются крайне высокой зашумленностью. Шумы возникают как из-за технических ограничений аппаратуры (артефакты движения, помехи от электронных компонентов), так и вследствие физиологических процессов (мышечная активность, спонтанная мозговая деятельность). Кроме того, паттерны биоэлектрической активности, связанные с моторными или когнитивными командами, обладают априорной неопределенностью параметров: их частотные границы, длительность и пространственная локализация варьируются в зависимости от психофизиологического состояния пользователя, уровня утомления и других факторов. Перечисленная совокупность проблем не позволяет достичь высокой точности классификации команд нейроуправления и частотно-временной локализации.

Существующие методы анализа ЭЭГ, основанные на спектральной энтропии, дискретном вейвлет-преобразовании или преобразовании Фурье, глубоком машинном обучении демонстрируют ограниченную эффективность в условиях такой нестабильности. Например, традиционные подходы часто требуют формирования объемной выборки примеров реализаций искомым паттернов или наличия априорной информации о частотном составе паттернов команд нейроуправления, что, в свою очередь, требует индивидуального подхода к каждому потенциальному пользователю нейрокомпьютерного интерфейса. Кроме того, низкая точность классификации, обусловлена также погрешностями при локализации паттернов на временной оси, так как исходные фрагменты ЭЭГ, помимо искомым паттернов, содержат

фоновую активность головного мозга несопряженную с командами нейроуправления. Подобного рода проблемы делают системы ИМК непрактичными для массового применения.

Диссертация Кириленко Николая Евгеньевича посвящена разработке метода частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса.

В диссертационной работе Кириленко Н.Н. решается **актуальная задача** повышения точности классификации команд нейроуправления нейрокомпьютерного интерфейса на основе решения задачи определения частотных и временных границ паттернов в составе многомерных сигналов ЭЭГ.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений подтверждается корректным применением методов теории алгоритмов, оптимального оценивания, теории информации и математической статистики, и инструментов моделирования, практикой успешного применения в рамках различных НИР. Ограничения и допущения, принятые при использовании известных подходов корректны, и адекватно отражают свойственную исследуемой предметной области специфику.

Научная новизна результатов диссертации

1. Разработан метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса, отличающийся от известных методов тем, что обладает свойством робастности к неизвестной вариативности текущего функционального состояния человека и к типу подготавливаемого человеком движения – реальному или мысленному, произвольному или баллистическому, позволяющий повысить точность классификации команд нейроуправления в составе нейрокомпьютерного интерфейса.

2. Разработаны критерии оптимальности для поиска границ локального частотного диапазона, максимально соответствующего частотному диапазону искомого паттерна биоэлектрической активности мозга человека, которые отличаются тем, что применимы в условиях маскирования паттерна шумами с близкими или частично совпадающими энергетическими спектрами, позволяющие определять временные и частотные границы паттернов команд нейроуправления.

3. Разработан алгоритм, отличающийся тем, что реализует разработанный метод и позволяет повысить точность классификации команд нейроуправления в нейрокомпьютерном интерфейсе.

Теоретическая значимость результатов, полученных в диссертации

Работа вносит вклад в развитие теории управления и обработки информации, в частности цифровой обработки сигналов, за счет синтеза новых критериев оптимальности и алгоритмов частотно-временного анализа. Разработанный метод расширяет инструментарий для анализа многомерных зашумленных данных, что актуально для задач системного анализа, управления, обработки информации и статистики.

Практическая ценность работы

Практическая значимость заключается в повышении точности классификации команд нейроуправления в ИМК, что подтверждено результатами экспериментальной апробации. Повышение точности классификации позволит разрабатывать нейроинтерфейсы, которые способны функционировать даже в условиях вариативности психофизиологического состояния пользователя.

Результаты диссертации внедрены в проекты по гранту РФ №20-19-00627 и Постановлению Правительства РФ №218, что подтверждается актами о внедрении. Программное обеспечение используется в Южном федеральном университете и может быть адаптировано для медицинских и промышленных нейроинтерфейсов.

Замечания по диссертации

1. В первой главе целесообразно было представить результат классификации методов, применяемых для решения задачи исследования в виде схемы. Такая классификация была бы полезной в том числе и для развития тематики исследования автором.
2. При рассмотрении задачи конструирования критериальных функций не приведены рекомендации к выбору величин временного окна, величины «перекрытия» временных окон. Интересен также вопрос о максимальной продолжительности сигналов и максимальном числе сенсоров, которые не влияют на качество обработки предлагаемым подходом.
3. В главе, посвященной разработке алгоритмов, автором приводятся значения некоторых параметров, например, 0,7 – пороговое значение при определении ближайших значений к минимуму критериальной функции, [520; 720] интервал изменения k и т.д., при этом отсутствует обоснование или рекомендации по выбору значений этих параметров.
4. В заключении третьей главы автором отмечается, что алгоритм реализующий разработанный метод частотно временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса показал высокую точность по сравнению с традиционными методами на модельных данных. Данный вывод подтверждается из материала главы, тем не менее для убедительности изложения, целесообразно было представить данные результаты в виде таблиц.
5. При оценке качества решения задачи бинарной классификации автором использовался критерий точности. При этом опущены расчеты полноты и F1-меры, что не позволяет делать полноценные выводы о качестве классификатора.
6. В диссертации присутствует ряд неточностей, в частности имеются повторяющиеся формулировки, некоторые термины требуют определений для исключения непонимания и т.д. В приложении А схемы представлены мелко, что затрудняет чтение.

Отмеченные замечания не снижают теоретической и практической значимости проведенных Кириленко Н.Е. исследований.

Заключение

Диссертационная работа Кириленко Н.Е. представляет законченное научное исследование, в котором решается актуальная научно-техническая задача, связанная с определением частотных и временных границ паттернов в составе многомерных сигналов ЭЭГ.

Диссертация соответствует научной специальности 2.3.1 - Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Содержание диссертации полно раскрывает суть и методы научных исследований.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, написана ясным языком. Основные положения и выводы по разделам четко сформулированы и логически связаны. Содержание автореферата отражает содержание диссертации.

Работа прошла широкую апробацию на 6 международных и российских научных конференциях. Личный вклад автора и основные научные результаты достаточно представлены в 22 опубликованных работах: 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (в том числе 3 из них К1) по данной специальности, одна статья в журнале, входящем в международную базу Scopus, 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 6 статей в сборниках трудов конференций.

Считаю, что представленная научно-квалификационная работа на тему «Метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса» отвечает заявленной научной специальности и соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями) в редакции от 01 января 2025 г.

Автор диссертации Кириленко Николай Евгеньевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Системы
автоматизированного проектирования и
поискового конструирования»
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический
университет»

5.06.2025

Щербаков Максим Владимирович

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28 e-mail: rector@vstu.ru контакт: тел. — 7 903 376 26 78 веб-сайт: <https://www.vstu.ru/>



Щербакова М.В.
05 июня 2025
Нач. общего отдела
(подпись)