

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ МОЗГА НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ

Э.Э. Кутлугильдин¹, Э.Р. Гиззатова¹, Г.К. Хисаметдинова¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа
e-mail: edikkutlugildin@gmail.com

Аннотация

В работе предложен алгоритм обработки электроэнцефалограммы ритмов головного мозга, управляющий экзоскелетом в реальном времени. Быстрое преобразование Фурье используется для выделения ритмов мозга и формирования признаков намерения движения.

Ключевые слова: экзоскелет, электроэнцефалограмма, быстрое преобразование Фурье.

Введение

Интеллектуальный экзоскелет относится к биотехническим системам поддержки принятия решений, в которых исполнительный механизм должен учитывать не только команду пользователя, но и его текущее состояние. В разрабатываемом проекте источником управляющей информации служит электроэнцефалограмма, содержащая сведения о внимании, утомлении и подготовке человека к запуску движений конечностей. Однако сама по себе ЭЭГ является достаточно шумным и нестационарным сигналом, из которой требуется выделить устойчивые частотные компоненты, пригодные для интерпретации в реальном времени. С этой целью, был разработан алгоритм, в основе которого заложена модель обработки и сглаживания шумовых дефектов посредством быстрого преобразования Фурье [1] и вейвлет-фильтрации [2, 3], а также нейросетевого классификатора на основе LSTM [4]. Оно позволяет выровнять частоту сигналов, улучшить их передачу, тем самым дать возможность интеллектуального управления экзоскелетом.

1. Математическая модель дискретного преобразования Фурье в применении к задаче управления экзоскелетом

В работе используются временные ряды, характеризующие ЭЭГ, с применением быстрого преобразования Фурье, основанного на формуле (1):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad (1)$$

где $X[k]$ – комплексные спектральные коэффициенты, j – мнимая единица.

Вычисление дискретного преобразования Фурье непосредственно по формуле (1) требует $O(N^2)$ арифметических операций, что при больших N (типичных для ЭЭГ)

делает анализ в реальном времени затруднительным. Поэтому в разработанном алгоритме используется быстрое преобразование Фурье – эффективный метод вычисления ДПФ, основанный на алгоритме Кули-Тьюки [5]. Быстрое преобразование Фурье снижает вычислительную сложность $O(N \log N)$ до , что позволяет пересчитывать спектр сигналов практически без задержки. В разрабатываемом алгоритме оцениваются относительные мощности пяти ритмов мозга, в соответствии с частотными диапазонами: δ (0,5–4 Гц), θ (4–8 Гц), α (8–13 Гц), β (13–32 Гц) и γ (32–100 Гц). Рост β - и γ -компонент рассматривается как признак активного внимания и моторной готовности, тогда как увеличение θ -компоненты может указывать на утомление.

2. Результаты работы

Проверка работоспособности алгоритма проводилась на общедоступных записях ЭЭГ из базы данных PhysioNet [6]. Анализировались фрагменты сигналов с канала моторной коры во время выполнения движений плечом. Сырая ЭЭГ [6] характеризуется наличием высокочастотного шума и мышечных артефактов.

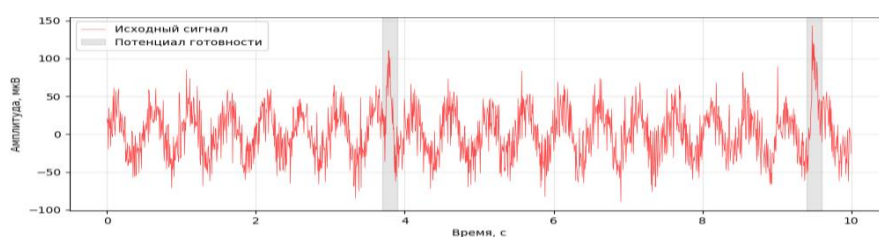


Рисунок 1 – Сырая ЭЭГ

Первым этапом обработки является применение дискретного вейвлет-преобразования Добеши (db4). В результате шумоподавления отношение сигнал/шум возрастает в среднем в 2,5 раза, а артефакты эффективно подавляются без сглаживания полезных транзиевтов.

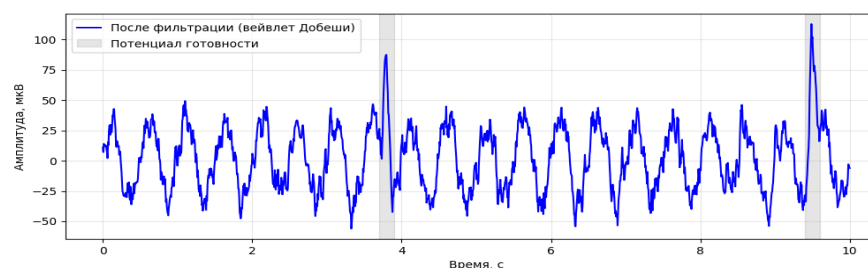


Рисунок 2 – ЭЭГ после фильтрации

На следующем этапе очищенный сигнал подвергается спектральному анализу с помощью быстрого преобразования Фурье. Вычисление относительной мощности в частотных диапазонах δ (0,5–4 Гц), θ (4–8 Гц), α (8–13 Гц), β (13–32 Гц) и γ (32–100 Гц) позволяет отслеживать функциональное состояние оператора. В частности, перед зарегистрированным движением наблюдался устойчивый рост β -компонент и γ -компонент, что соответствует феномену событийно-связанной десинхронизации. Финальным этапом предварительной обработки является детекция кратковременного потенциала готовности, выполняемая с помощью комплексного непрерывного вейвлет-преобразования Морле. Последнее обеспечивает наилучшее частотно-временное

разрешение, необходимое для локализации события длительностью 200–500 мс. На представленной выборке пик огибающей в бета-диапазоне был зафиксирован в момент времени, соответствующий метке намерения. Классификация намерения с использованием LSTM. Для автоматического распознавания момента готовности пользователя к движению в разработанном алгоритме используется рекуррентная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью. В отличие от обычных полносвязных сетей, LSTM способна учитывать долговременные зависимости во временных рядах, что критически важно для анализа ЭЭГ, где движение предваряется характерным паттерном потенциала готовности за 200–500 мс до начала мышечной активности. На вход LSTM подаются векторы признаков, включающие относительные мощности ритмов и отсчёты очищенного сигнала после вейвлет-фильтрации. Выходной слой сети выдаёт вероятность намерения. Обучение и тестирование LSTM проводились на размеченных фрагментах того же датасета. Достигнуты следующие показатели:

- точность – 87%,
- площадь под ROC-кривой – 0,94,
- чувствительность – 0,85, специфичность – 0,89.

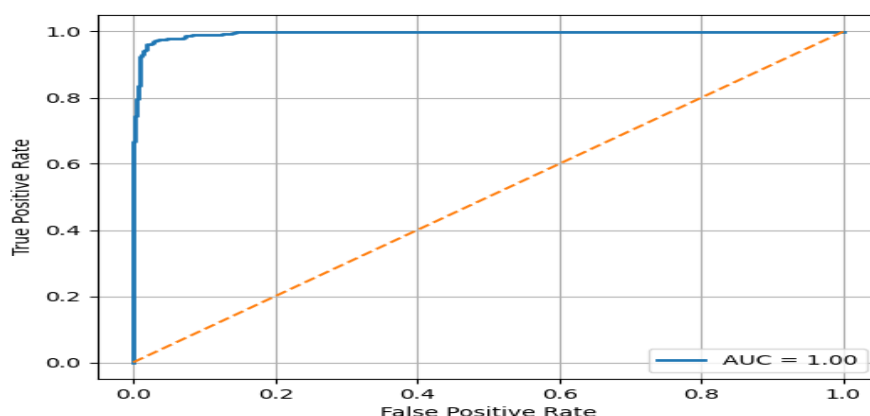


Рисунок 3 – ROC – кривая

Полученные результаты подтверждают, что совместное использование вейвлет-фильтрации, спектрального анализа и LSTM-классификатора позволяет сформировать стабильный и устойчивый к шумам алгоритм детекции намерения движения, работающий в реальном времени. Это даёт возможность системе плавно подключать экзоскелет, минимизируя задержку и повышая безопасность.

Заключение

Таким образом, лежащее в основе алгоритма оценки интеллектуального управления экзоскелетом быстрое преобразование Фурье является эффективным и интерпретируемым инструментом анализа ЭЭГ для задач управления экзоскелетом. Он позволяет выделять ритмы мозга, оценивать состояние оператора и формировать признаки для классификации намерения движения. Научная новизна работы состоит в интеграции спектрального анализа в архитектуру BodyOS и в использовании этих признаков для безопасного управления по принципу «сначала рука, потом экзоскелет». Практическая значимость проекта связана с возможностью применения прототипа в реабилитационных, образовательных и ассистивных системах.

Список использованных источников

1. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер // 3-е изд., испр. – М. : Техносфера, 2012. – 1048 с.
2. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing / S. Mallat. 2nd ed. – San Diego : Academic Press, 1999. – 637 p.
3. Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets / I. Daubechies. // Philadelphia : SIAM, 1992. – 357 p.
4. Hochreiter, S. Long short term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – V. 9, № 8. – P. 1735–1780.
5. Cooley, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series / J. W. Cooley, J. W. Tukey // Mathematics of Computation. – 1965. – V. 19, № 90. – P. 297–301.
6. EEG Archive. – URL: <https://physionet.org/about/database> (дата обращения: 30.03.2026).

ALGORITHM FOR FILTERING BRAIN SIGNALS BASED ON THE FOURIER TRANSFORM FOR AN EXOSKELETON CONTROL SYSTEM

E.E. Kutlugildin¹, E.R. Gizzatova¹, G.K. Khisametdinova¹

*¹Ufa University of Science and Technology, Ufa
e-mail: edikkutlugildin@gmail.ru*

Abstract

The paper proposes an algorithm for processing electroencephalogram brain rhythms to control an exoskeleton in real life. The fast Fourier transform is used to extract brain rhythms and form movement intention features.

Keywords: exoskeleton, electroencephalogram, fast Fourier transform.