

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ БІОСИГНАЛІВ У ВЕБ-СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій роботі досліджено підхід до стабілізації та візуалізації мультимодальних біосигналів у веб-системі реального часу. Розглянуто ключові джерела нестабільності даних та запропоновано програмні методи їх компенсації: синхронізацію потоків, м'яку реконструкцію пропусків, адаптивне згладжування та формування маски довіри. Реалізована система забезпечує коректне відображення інтегрального показника концентрації та значно знижує рівень шумових артефактів. Отримані результати показують, що застосовані методи стабілізації забезпечують більш плавний і інтерпретований сигнал у порівнянні з необробленими даними.

Ключові слова: біосигнали, веб-системи реального часу, мультимодальні дані, стабілізація сигналів, ЕЕГ, інерційні датчики, фільтрація, адаптивне згладжування, маска довіри, індекс концентрації, носимі пристрої.

Abstract

This paper investigates an approach to stabilizing and visualizing multimodal biosignals in a real-time web system. Key sources of data instability are considered and software methods for their compensation are proposed: stream synchronization, soft gap reconstruction, adaptive smoothing, and confidence mask formation. The implemented system provides correct display of the integral concentration index and significantly reduces the level of noise artifacts. The results obtained show that the applied stabilization methods provide a smoother and more interpretable signal compared to the raw data.

Keywords: biosignals, real-time web systems, multimodal data, signal stabilization, EEG, inertial sensors, filtering, adaptive smoothing, confidence mask, concentration index, wearable devices.

Вступ

Візуалізація біосигналів у реальному часі є критичним елементом носимих систем моніторингу, однак у практичних умовах її ускладнює нестабільність потоків даних. Сигнали ЕЕГ, фотоплетизмографії та інерційних сенсорів надходять з різною частотою, містять пропуски, артефакти руху та нерівномірні часові зсуви, що робить їх пряме відображення у веб-інтерфейсі некоректним та важким для інтерпретації. У більшості наявних рішень передбачається або використання високовартісних апаратних модулів із апаратною фільтрацією, або офлайн-обробка даних, що не підходить для легких носимих пристроїв. Крім того, у складі експертних систем різного призначення однією з базових є підсистема підтримки прийняття рішень, яка, у свою чергу, потребує необхідності у процедурі класифікації біомедичних сигналів [1]. Тому актуальним є створення веб-системи, здатної забезпечити узгоджену та інформативну візуалізацію мультимодальних біосигналів у реальному часі, компенсуючи недоліки недорогих сенсорів програмними методами синхронізації, стабілізації та реконструкції даних.

Основна частина

У реальних умовах роботи носимої системи потік біосигналів формується нерівномірно: пакети даних надходять із різною затримкою, частина з них втрачається або приходить із простроченими мітками часу, а рухи голови та нестабільний контакт електродів спричиняють електричні та механічні артефакти [2]. Тому основою підвищення достовірності стало формування єдиного, причинно впорядкованого потоку даних, у якому кожен вимір займає правильне місце на часовій шкалі. Цього було досягнуто завдяки встановленню часової синхронізації на рівні мікроконтролера: усі датчики працюють у єдиній часовій системі, а пакети маркуються моментом формування, а не моментом передачі. Завдяки цьому виключається поява «відкатів» графіка і зберігається причинно-коректний порядок зміни індексу [3].

Короткочасні втрати даних, неминучі під час бездротової передачі або при мікрозсувах електрода, компенсуються реконструкцією пропущених фрагментів за умови, що пропуск є незначним за тривалістю та не супроводжується ознаками поганого контакту. Реконструкція виконується з урахуванням «віку» даних: якщо затримка перевищує допустиму межу, фрагмент не відновлюється, але

позначається як недостовірний у масці якості. Це дозволяє уникати хибного згладження тривалих втрат сигналу та зберігати достовірність часової структури потоку [4].

Оскільки значна частина спотворень пов'язана з рухами голови, було запроваджено механізм оцінки достовірності вимірювання на основі допоміжних даних IMU. Маска довіри зменшує внесок потенційно спотворених фрагментів у формування індексу: у моменти, коли датчики фіксують рух або погіршення контакту, вагомість ЕЕГ у загальному розрахунку знижується. Такий підхід дає змогу не виключати дані повністю, а коректно зменшувати їхній вплив на кінцевий показник там, де вони менш надійні [5].

Для забезпечення плавності та фізіологічної правдоподібності зміни інтегрального індексу застосовано адаптивне згладжування, яке пригнічує випадкові викиди, не впливаючи на реальну динаміку когнітивного процесу. Модель згладжування має змінну інтенсивність: за умов стабільного сигналу індекс реагує швидше, а при появі нестабільності згладжування стає сильнішим, щоб не допустити стрибків, зумовлених шумами. Додатково швидкість зміни інтегрального показника обмежується з урахуванням фізіологічно реалістичних темпів зміни уваги [6], що запобігає появі псевдострибків при одиничних артефактах. Усі розроблені методи були інтегровані у веб-систему реального часу, що забезпечило коректне та стабільне відображення поточкових біосигналів у браузері.

Результати

Результати експерименту на рисунку 1 демонструють суттєву різницю між сирим інтегральним показником концентрації та сигналом після застосування розроблених алгоритмів стабілізації. На графіку, що відповідає необробленим даним, спостерігається значна шумова складова та нерегулярність амплітуди: сигнал містить велику кількість випадкових локальних піків і провалів, які не відображають реальну динаміку когнітивного стану. Амплітудні коливання мають хаотичний характер, а загальний тренд сигналу практично не проглядається через високу щільність артефактних змін. Це ускладнює аналіз та робить такий індекс непридатним для подальшої інтерпретації у режимі реального часу.

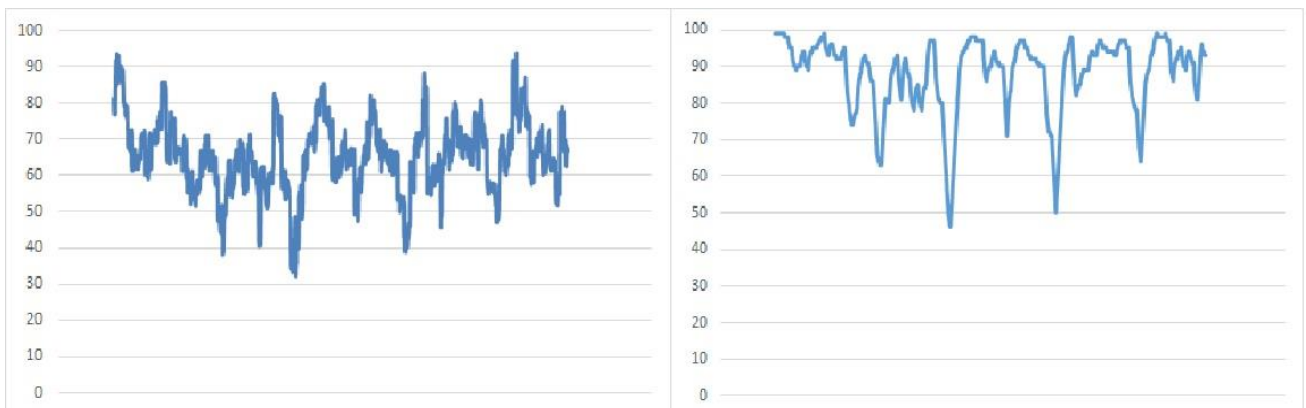


Рисунок 1 — Порівняння інтегрального показника концентрації до застосування методів стабілізації (ліворуч) та після обробки сигналу (праворуч).

Після застосування методів синхронізації, реконструкції пропусків, адаптивного згладжування та маски довіри форма сигналу суттєво змінюється. На графіку «після» видно чіткий, плавний тренд із збереженням ключових характеристик динаміки уваги, тоді як шумові осциляції практично повністю усунені. Глибокі провали сигналу, характерні для артефактів руху або втрати контакту електродів, виникають значно рідше й мають більш визначену структуру, що дозволяє однозначно віднести їх до технічних, а не когнітивних змін. Локальна варіативність значень зменшилася, і сигнал набув фізіологічно обґрунтованої плавності, що відповідає реальному темпу змін концентрації.

Висновки

У роботі продемонстровано, що стабільна та інтерпретована візуалізація мультимодальних біосигналів у веб-системах реального часу може бути досягнута навіть на недорогих носимих пристроях за умови використання спеціалізованих програмних методів обробки. Запропонований підхід усуває ключові проблеми недостовірності — нерівномірність надходження даних, пропуски, запізнення пакетів, артефакти руху та втрату контакту електродів — без зміни апаратної складової.

Реалізовані методи синхронізації часових міток, м'якої реконструкції пропусків, адаптивного згладжування та маски довіри забезпечили формування причинно узгодженого потоку біосигналів. Завдяки цьому інтегральний показник уваги став плавним, керованим і чутливим до реальних змін когнітивного стану, а шумові та артефактні коливання були суттєво приглушені. Експериментальні результати підтвердили, що після обробки сигнал втрачає хаотичну структуру та набуває фізіологічно обґрунтованої динаміки, що робить систему придатною для інтерпретації у реальному часі та подальшого алгоритмічного аналізу.

Таким чином, запропонована технологія створює надійну основу для розвитку веб-орієнтованих систем моніторингу когнітивних станів. Вона може бути адаптована для освітніх лабораторій, демонстраційних нейротехнологічних комплексів та дослідницьких застосувань, а також слугувати фундаментом для майбутніх рішень зі злиття даних, персоналізації індексів та автоматизованого аналізу поведінкових патернів

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мартинюк , Т., Кожем'яко , А., Круківський , Б., & М'якішев , О. (2024). Моделювання процесу ранжування у нейромережному класифікаторі об'єктів. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 48(2), 128–134. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-128-134>.
2. Motion Artifact Removal Techniques for Wearable EEG and PPG Sensor Systems [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.li/lfgfks>
3. Real-Time EEG Signal Enhancement Using Canonical Correlation Analysis (PMC, 2018) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5823426/>
4. A Systematic Review of Techniques for Artifact Detection and Removal in Wearable EEG (Sensors, 2025) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/18/5770>
5. MLMRS-Net: Electroencephalography (EEG) motion artifacts removal [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-022-08111-6>.
6. AnEEG: leveraging deep learning for effective artifact removal in EEG data [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-75091>.

Перебора Микола Анатолійович — студент групи 1KI-24м, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький Національний Технічний Університет, Вінниця.

Кожем'яко Андрій Вікторович — к. т. н., доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Perebora Mykola Anatoliovich — student of group 1KI-24m, faculty of information technologies and computer engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Kozhemiako Andrii Viktorovych — a Cand. of Tech. Sc. of the Department of Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia