

Експрес-аналіз біомедичних сигналів в процесі тривалого моніторингу функціональних станів біооб'єктів

Богдан Шевчук

д. т. н., провідний науковий співробітник Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, проспект Академіка Глушкова, 40, 03187, Київ, e-mail: incors@ukr.net

Запропонований експрес-аналіз функціональних станів операторів, спортсменів, практично здорових людей та пацієнтів клінік на основі визначення параметрів суттєвих відліків моніторингових сигналів з подальшим обчисленням різноманітних локальних, статистичних та інтегральних показників і параметрів фрагментів та поточних вибірок сигналів з урахуванням визначеної достовірності суттєвих відліків сигналів. Отримані дані є основою для стиску-захисту моніторингових масивів даних та обчислення показників інформативних зубців, комплексів, сегментів та інтервалів біомедичних сигналів, їх фрагментів та вибірок. В результаті будь-які дії та поведінка біооб'єктів характеризуються інформаційними образами у вигляді обчислених показників, функцій, діаграм, графіків, двовимірних та тривимірних площин. Запропонована інформаційна технологія орієнтована на багатодобовий моніторинг функціональних станів біооб'єктів.

Ключові слова: експрес-аналіз сигналів; тривалий моніторинг; суттєві відліки сигналів; показники сигналів; функціональний стан біооб'єктів

Вступ. Тривалий моніторинг функціональних станів біооб'єктів (операторів, спортсменів, практично здорових людей, пацієнтів клінік та ін.) є ефективним та дієвим способом запобігання аварійних ситуацій при роботі людей зі складними технічними системами, запобігання травмування та захворюваності різноманітних груп людей. Показники функціональних станів (ФС) біооб'єктів (БО) по суті є результатами оброблення та інтерпретації комплексу фізико-фізіологічних, психофізіологічних сигналів та вимірних медико-біологічних даних. Аналіз підходів до моніторингу ФС БО, які перебувають у вільному русі, показує [1,2], що найбільш інформативними біомедичними сигналами є електрокардіосигнали (ЕКС), сигнали дихання, енцефалографічні сигнали, наприклад, показники низькочастотних потенціалів мозку, показники температури тіла та його ділянок і кінцівок, артеріального тиску, ритмів серця і дихання, рівня кисню в крові, а також біомеханічні сигнали. На сьогоднішній день для моніторингу широкого розповсюдження отримали смарт-кільця Oura Ring [3], Iris smart ring [4], пульсометри з електродними поясами, наприклад, компаній Polar, Garmin і ін. Також широкого застосування отримали фітнес-браслети та смарт-годинники.

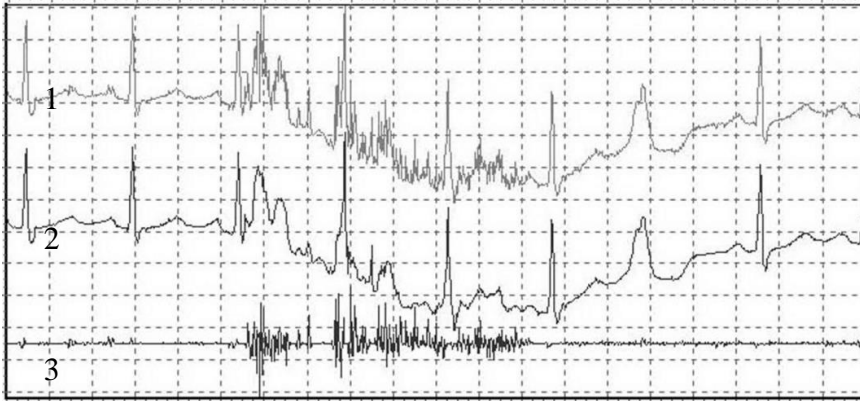
При застосуванні різноманітних пристроїв, систем та мереж довготривалого моніторингу БО в місцях введення моніторингових даних (тобто безпосередньо на БО) важливо забезпечити контроль введення достовірних даних та виявлення найбільш інформативних фрагментів і вибірок моніторингових сигналів з подальшою передачею стислої та захищеної інформації у віддалену базу даних та віддаленим експертам, дослідникам, кардіологам, фізіологам.

Метою статті є розроблення методології оперативного оброблення моніторингових сигналів з виявленням найбільш інформативних ділянок поточних вибірок біомедичних сигналів для якісної оцінки поточних функціональних станів біооб'єктів. На основі програмної реалізації алгоритмів експрес-аналізу тривалих вибірок моніторингових біомедичних сигналів процесорними засобами портативних об'єктних систем (ОС) безпроводних моніторингових мереж (БММ) забезпечується виявлення найбільш діагностичних та інформативних даних про стан БО.

1. Забезпечення інформативності та достовірності моніторингу сигналів

Засоби моніторингу [5] утворюють ланку відбору, введення, підсилення, фільтрації, перетворення, оброблення, кодування та передавання біомедичних сигналів в складі: тіло людини – електродний пояс – підсилювачі та фільтри – аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – процесор оброблення, кодування, накопичення та передавання даних моніторингу. Інформативність та достовірність моніторингу біомедичних сигналів суттєво залежить від точності засобів аналогового тракту підсилення та фільтрації сигналів та умов відбору моніторингової інформації. В медичній практиці, наприклад, в електрокардіографії, при дослідженнях забезпечуються практично ідеальні умови реєстрації ЕКС. Пацієнт лежить непорушно, а в певні моменти часу затримує дихання. Як правило, для широко розповсюджених електрокардіографів [2] динамічний діапазон реєстрації ЕКС складає 0.03 – 5 мВ (в більш діагностичному кардіографі [6] динамічний діапазон ЕКС складає 1 мкВ – 10 мВ), смуга частот ЕКС – 0.05 – 150 Гц, частота дискретизації АЦП – 1000 Гц і більше. В умовах тривалого моніторингу біооб'єктів, коли людина перебуває у вільному русі, веде звичний для себе спосіб життя та праці при реєстрації біомедичних сигналів виникають різноманітні додаткові завади [1]. На ЕКС накладаються завади, пов'язані з рухомістю електродів, із-за рухомістю м'язів грудної клітки у вимірювальний тракт проникають електроміографічні сигнали. Дослідження тривалої реєстрації ЕКС (рис. 1) показують, що навіть при застосуванні одноразових холтерівських електродів з якісним контактом «тіло-електрод» при рухах людини на вихідних сигналах спостерігаються шуми та завади. Також присутній дрейф ізоляції ЕКС. По кожному каналу введення та перетворення моніторингових сигналів засобами ОС БММ формується та запам'ятовується масив вхідних відліків з шумами $\{X_i^N\}$, $i=1, \dots, s$, s - максимальна кількість вхідних відліків. В [5] запропонована послідовність виконання мінімальної кількості обчислювальних операцій, згідно якої із вхідного масиву даних $\{X_i^N\}$ визначають

масив профільтрованих відліків $\{X_i^F\}$ та компактний масив різницевих значень $\{\Delta X_i^N\}$, який є опосередкованою оцінкою шумових складових у вхідному сигналі, де $\Delta X_i^N = |X_i^F - X_i^N|$. Найбільш інформативними відліками сигналів, тобто суттєвими відліками (СВ), є екстремуми і точки перегину профільтрованих сигналів, достовірність яких характеризується величинами $\{X_i^N\}$.



1 – вхідний ЕКС з шумами; 2 – профільтрований ЕКС;
3 – шумова складова ЕКС.

Рис. 1. Фрагменти результатів добового моніторингу ЕКС людини

2. Адаптивна фільтрація та експрес-аналіз моніторингових сигналів

В процесі моніторингу БО важливо довіряти профільтрованим сигналам, контролюючи достовірність СВ [5]. Будь-яка фільтрація спотворює обвідну сигналу. З метою мінімізації спотворень обвідних біомедичних сигналів з мінімальним виконанням обчислювальних операцій в [5] запропонований комбінований алгоритм адаптивної фільтрації поточних вибірок сигналів, який в околиці екстремумів виконує адаптивну фільтрацію з ковзним середнім, а на ділянках між екстремумами – адаптивну медіанну фільтрацію зі змінним вікном аналізу даних (пошук медіани здійснюється з обмеженої кількості відліків, які характеризують тенденцію зміни обвідної сигналу). Для достовірного введення сигналу частоту його дискретизації f_d вибирають значно підвищеною з урахуванням виразу $f_d = kf_{dH} = 2kf_{max}$ [5], де $k \geq 10$ - коефіцієнт підвищення частоти дискретизації з урахуванням параметрів вхідного фільтра нижніх частот та вимог до достовірності молодших біт аналого-цифрового перетворювача, f_{dH} - частота дискретизації сигналу згідно досліджень Найквіста, f_{max} - найвища інформативна частота спектру сигналу. Для якісного введення та перетворення низькоамплітудних (мікрвольтових) біомедичних сигналів ефективним є застосування чіпів з багатоканальними сігма-дельта АЦП, наприклад, чіп ADS1299 компанії Texas Instruments. Визначені параметри СВ сигналів є основою для стиску-захисту масивів моніторингових даних [5].

Після фільтрації та компенсації дрейфу ізолінії обчислюються амплітудно-часові показники інформативних зубців, комплексів, сегментів та інтервалів біомедичних сигналів, а також відносні і нормовані показники та характеристики фрагментів сигналів та статистичні, спектральні, ентропійні і хаотичні показники і функції поточних вибірок моніторингових сигналів [5]. Для аналізу внутрішньої структури вибірок моніторингових сигналів, визначення видів комплексів та екстрасістол ефективним є обчислення поточних динамічних показників сигналів з урахуванням сумарних значень абсолютних різницевих амплітуд між сусідніми СВ на заданих інтервалах [5], враховуючи частоту опиту сигналу (кількість відліків на інтервалі аналізу) та порогові величини, задані дослідником. Також підраховуються частоти зустрічі виявлених типів комплексів та екстрасістол на протязі тривалих інтервалів (однієї години і більше). На основі апертурного та зонного контролю обчислених параметрів та функцій фрагментів та вибірок сигналів формуються логіко-статистичні інформаційні моделі поведінки БО [7]. В результаті будь-які дії та поведінка біооб'єктів характеризуються інформаційними образами у вигляді обчислених показників, діаграм, графіків, двовимірних та трьохвимірних площин обчислених функцій.

Висновки. Достовірність експрес-аналізу функціональних станів біооб'єктів базується на якісному введенні біомедичних та біомеханічних сигналів, які характеризують функціонування різноманітних систем організму людини в повсякденному житті. В процесі введення, оброблення, кодування, накопичення та передавання даних тривалого моніторингу станів біооб'єктів важливо кодувати та відображати на моніторах комп'ютерів достовірність введених даних. Основою оперативної обробки вибірок моніторингових сигналів є амплітудно-часові параметри та показник достовірності найбільш інформативних відліків сигналів, тобто суттєвих відліків сигналів, до яких відносяться екстремуми та точки перегину обвідних сигналів. Для визначення достовірності поточного суттєвого відліка прийнята оцінка рівня шумів, яка є різницею між вхідним відліком і профільтованим відліком. Будь-яка фільтрація сигналів спотворює його обвідну, тому достовірним вважається суттєвий відлік, шуми якого не перевищують, наприклад, 1-2 кванта АЦП. Для мінімального спотворення обвідної сигналу доцільно застосувати комбіновану фільтрацію, основою якої є медіанна фільтрація з адаптивним вікном, а в околиці екстремуму здійснюється ковзке середнє з мінімальним вікном усереднення. Для оперативного аналізу внутрішньої структури поточної вибірки моніторингового сигналу та ідентифікації характерних комплексів, різноманітних екстрасістол обчислюються сумарні значення абсолютних різницевих показників між сусідніми суттєвими відліками на заданих інтервалах з урахуванням частоти опиту сигналу та порогових величин, заданих дослідником. Параметри суттєвих відліків є основою для обчислення відносних і нормованих показників та характеристик фрагментів сигналів, а також статистичних, спектральних, ентропійних та хаотичних показників і функцій поточних вибірок моніторингових сигналів. Шляхом апертурного та зонного контролю обчислених

показників та функцій здійснюється формування логіко-статистичних інформаційних моделей поведінки біооб'єктів. Параметри цих моделей характеризують поточні функціональні стани біооб'єктів. Також дії і поведінка біооб'єктів характеризуються інформаційними образами у вигляді обчислених показників, діаграм, графіків, двовимірних та трьохвимірних площин обчислених функцій. З урахуванням достовірності визначення суттєвих відліків поточних вибірок та фрагментів сигналів на моніторах комп'ютерів для експертів та дослідників відповідним кольором відображаються графічні результати аналізу моніторингових сигналів. Запропонована інформаційна технологія орієнтована на багатодобовий моніторинг функціональних станів біооб'єктів в різних галузях людської діяльності.

Література

- [1] Гераїмчук М.Д., Шевчук Б.М., Ткачук В.Г., Брайко Ю.О. Інформаційно-ефективна технологія дистанційного моніторингу параметрів фізіологічних систем організму людини. К.: Едельвейс, 2012. -102 с.
- [2] Абакумов В.Г., Рибін О.І., Сватош Й. Біомедичні сигнали. Генезис, обробка, моніторинг. К.: Нора-прінт, 2001. – 516 с.
- [3] <https://www.ouraring.com>
- [4] <https://www.kickstarter.com/projects/iris-smart-ring/iris-smart-ring-elevate-style-embrace-self-awareness>
- [5] Шевчук Б.М. Методи та алгоритми підвищення інформаційної ефективності безпроводних моніторингових мереж. – К.: Наукова Думка, 2020. - 218 с.
- [6] Мещанинов С.К., Співак В.М., Орлов А.Т. Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань. – К.: Кафедра, 2016. – 211 с.
- [7] Шевчук Б.М. Моделювання та аналіз станів об'єктів і суб'єктів моніторингу засобами захищених сенсорних мереж та мереж IoT з суперкомп'ютером/ Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2021. – Вип. 33. – С. 191-195.

Express analysis of biomedical signals in the process of long-term monitoring of functional states

Bohdan Shevchuk

Express analysis of the functional states of operators, athletes, practically healthy people and patients of clinics is proposed based on the determination of the parameters of significant references of monitoring signals. Subsequently, a variety of local, statistical and integral indicators and parameters of fragments and current samples of signals are calculated, taking into account the determined reliability of significant signals. The data obtained is the basis for compression and protection of monitoring data arrays and calculating indicators of informative teeth, complexes, segments and intervals of biomedical signals, their fragments and samples. As a result, any action and behavior of bio-objects are characterized by information images in the form of calculated indicators, functions, diagrams, graphs, two-dimensional and three-dimensional planes. The proposed information technology is focused on many day monitoring of functional states of bio-objects.

Отримано 31.03.23