

І.Ю. ХУДЕЦЬКИЙ, Ю.В. АНТОНОВА-РАФІ, А.В. ШЕВЧУК
Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. І. Сікорського»

МЕТОДИКИ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ СЕРЦЕВОГО РИТМУ ДЛЯ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

Проаналізовані методики застосування математичного аналізу серцевого ритму для оцінки функціонального стану людини та визначено як оптимальну методику застосування вейвлет-аналізу для оцінки функціонального стану організму людини з застосуванням сучасних безпроводних медичних гаджетів. Об'єктивна оцінка роботи серця є інтегративною характеристикою, що дозволяє комплексно та системно оцінити функціональний стан здоров'я людини в цілому. Аналіз варіабельності серцевого ритму – це технологія вивчення і оцінки вегетативної регуляції фізіологічних функцій, що пов'язана з використанням програмно-апаратних комплексів, які повинні забезпечити надійне зняття інформації, надійне розпізнавання та вимірювання кардіоінтервалів з побудовою тимчасових динамічних рядів і застосування до них стандартизованих математичних процедур аналізу. В даний час актуальною є розробка прогностичних моделей на основі оцінки поточного функціонального стану організму за допомогою автоматизованих комплексів для аналізу та візуалізації RR-інтервального ряду.

Ключові слова: вейвлет-аналіз, кардіоінтервалографія, ритмограма, спектральний аналіз.

IGOR KHUDETSKYI, JULIA ANTONOVA-RAFI, ANASTASIA SHEVCHUK
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHODS OF THE APPLICATION OF MATHEMATICAL ANALYSIS OF HEART RHYTHM TO ASSESS THE FUNCTIONAL STATE OF THE HUMAN BODY

An objective evaluation of the heart's work by an integrative characteristic that allows a complex and systemic assessment of the functional state of human health as a whole. The analysis of heart rate variability is a technology for studying and evaluating the vegetative regulation of physiological functions associated with the use of software and hardware complexes that must provide reliable information retrieval, reliable recognition and measurement of cardio intervals with the construction of temporary dynamic series and the application of standardized mathematical analysis procedures to them. At present, development of prognostic models based on the evaluation of the current functional state of the organism using automated complexes for analysis and visualization of the RR-interval series is actual. HRV analysis is associated with the use of hardware and software systems that must ensure reliable information retrieval, reliable recognition and measurement of cardio intervals with the construction of temporary dynamic series and the application of standardized mathematical analysis procedures to them. The use of the wavelet analysis apparatus for processing medical information is the most promising in comparison with other methods. It is his use that allows us to identify key diagnostic features and obtain a frequency-time characteristic of the signal under study. We propose the use of modern hardware and software systems based on the use of wireless technologies that could contain both long-term and short-term recording modes and could conduct a monitoring analysis of the rhetoric of dispersion. If they go beyond the limits of the norm, they could provide the transfer of information to the server for the coincidence of data and further dispatch to a medical institution for detailed analysis.

Keywords: wavelet analysis, cardiointervalography, rhythmogram, spectral analysis.

Постановка проблеми

Визначення стану організму людини в реальному режимі часу без обмеження можливості її звичайної повсякденної діяльності є важливим завданням для сучасної медицини. Це в свою чергу потребує вирішення ряду питань. Перш за все це вибір максимально інформативного показника функціонального стану. Інше питання – це можливість реєстрації цього показника з застосуванням носимих безпроводних гаджетів.

Цим вимогам відповідають показники варіабельності серцевого ритму (ВСР). В даний час ритм серця розглядається не тільки як показник власної функції синоатріального вузла як водія ритму, але в більшій мірі як інтегральний маркер стану безлічі систем, що забезпечують гомеостаз організму. По структурі серцевого ритму, закладеного в послідовності RR-інтервалів, можна судити про адаптаційні механізми, рівень функціонування вегетативної підсистеми організму, що дозволяє виявити реакцію організму людини на стрес, а також провести експрес-аналіз поточного стану. Дана методика відповідає і іншій вимозі – створенню неінвазивної безпроводної носимої апаратури, що дозволяє отримувати необхідну інформацію не обмежуючи пацієнта в його повсякденній діяльності. З огляду на широкі перспективи розвитку методу, тим більше важливо забезпечити його стандартизацію і порівнянність даних, одержуваних різними дослідниками [1].

Аналіз останніх джерел

Виділяють наступні групи методів оцінки варіабельності серцевого ритму:

- методи часової області - спираються на статистичні методи та направлені на дослідження загальної варіабельності;
- методи частотної області - дослідження періодичних складових ВСР;
- інтегральні показники ВСР (відносять автокореляційний аналіз і кореляційну ритмографію).

Для дослідження феномена регуляції серцевого ритму анатомічними структурами застосовується аналіз ВСР, або метод кардіоінтервалографії. Суть методики кардіоінтервалографії полягає в наступному.

Ресструється електрокардіограма (ЕКГ) в трьох основних відведеннях (ліва рука – права рука, ліва рука – ліва нога, права рука – ліва нога). За отриманою ЕКГ визначаються інтервали між сусідніми R-зубцями, які називаються RR-інтервали, або кардіоінтервали. Для реалізації аналізу варіабельності серцевого ритму необхідно від 100 (для лінійного аналізу) до 3000 (для нелінійного аналізу) кардіоінтервалів. Далі проводять статистичний, гістографічний, кореляційний і спектральний аналіз ритмограм.

Статистичні методи засновані на вимірі NN-інтервалів, а також на порівнянні показників. Вони дають кількісну оцінку варіабельності. Пацієнт після обстеження отримує кардіоінтервалограму, яка представляє собою сукупність RR-інтервалів, які відображаються один за одним [2].

Метою роботи є дослідження існуючих методик оцінки функціонального стану організму людини та вибір найбільш функціонально значимої для застосування із сучасними безпроводними медичними гаджетами.

Виклад основного матеріалу

Для аналізу кардіоінтервалограми використовуються наступні критерії.

- SDNN – стандартне відхилення всіх NN-інтервалів. Відображає всі періодичні складові варіабельності за час запису, тобто є сумарним показником ВСР;
- RMSSD – дані оцінки співвідношення NN-інтервалів;
- pNN50 – цей критерій представляє відношення NN-інтервалів, які відрізняються один від одного більш ніж на 50 мс, із загальним числом NN-інтервалів.

Для аналізу ВСР використовуються також геометричні методи. Суть полягає в отриманні закону розподілу кардіоінтервалів як випадкових величин. Розподіл тривалості кардіоінтервалів відображають на гістограмі.

У стресових ситуаціях, а також при патологічних станах діаграма буде з гострою вершиною (ексцесивна). Асиметрична діаграма спостерігається при перехідних процесах, порушенні стаціонарного процесу. Багатовершинна діаграма свідчить про несинусовий ритм (екстрасистолії, миготливої аритмії).

Геометричні методи дозволяють оцінити варіабельність серцевого ритму за допомогою наступних параметрів: моди, амплітуди моди і варіаційного розмаху. Мода (Mo) відповідає кількості RR-інтервалів, які зустрічаються найбільш часто, отже, дозволяють оцінити реальний стан систем регуляції пацієнта. Амплітуда моди (AMo) показує частку інтервалів, які відповідають значенням моди. Цей параметр відображає стабілізуючий ефект централізації управління серцевим ритмом. Варіаційний розмах (VAR) відповідає різниці між тривалістю найбільшого і найменшого інтервалів. Для того, щоб оцінити ступінь адаптації серцево-судинної системи до різних факторів і подивитися ступінь регуляції даних процесів використовуються додаткові параметри, які розраховуються. До них відносять індекс вегетативної рівноваги (ІВР), показник адекватності процесів регуляції (ПАПР), індекс напруги регуляторних систем (ІН), вегетативний показник ритму (ВІР). Індекс вегетативної рівноваги показує співвідношення впливу на серцево-судинну систему симпатичної і парасимпатичної систем. Вегетативний показник ритму відображає баланс регуляції роботи серцево-судинної системи з боку симпатичного і парасимпатичного відділу вегетативної нервової системи. Індекс напруги вказує на ступінь впливу нервової системи на роботу серця.

Автокореляційний аналіз використовується для оцінки серцевого ритму як випадкового процесу. Являє собою якісний аналіз, за даними якого можна судити про вплив на автономну систему серця центральної ланки.

Кореляційна ритмографія або скатерографія – це графічне відображення розподілу кардіоінтервалів (попереднього і наступного) в двомірній координатній площині. При цьому по осі абсцис відкладається величина $R-R_i$, а по осі ординат – величина $R-R_i + 1$. Графік і область точок, отриманих таким чином (плями Пуанкаре або Лоренца), називається кореляційною ритмограмою, або скатерограмою. Цей спосіб оцінки ВСР відноситься до методів нелінійного аналізу та особливо для розпізнавання і аналізу серцевих аритмій. На ритмограмі виділяють «хмару» – еліпс, який відповідає стандартному відхиленню всіх NN-інтервалів. Завдяки цьому методу можна оцінити активність симпатичної вегетативної нервової системи по відношенню до серця. У здорової людини на скатерограмі еліпс буде витягнутий уздовж бісектриси [3].

Застосування методу спектрального аналізу ВСР дозволяє кількісно оцінити вплив на роботу серця різних регуляторних систем. Виділяють три основних спектральних компонента, які відповідають коливанням ритму серця різної періодичності – високочастотні (High Frequency – HF), низькочастотні (Low Frequency – LF) і дуже низькочастотні (Very Low Frequency – VLF) компоненти, які використовуються при короткочасному записі ЕКГ (табл. 1).

Таблиця 1

Компоненти спектру

Назва компонентів спектру	Частотний діапазон, Гц	Період, с
HF	0,4 – 0,15	2,5 – 6,6
LF	0,15 – 0,04	6,6 – 25,0
VLF	0,04 – 0,015	25,0 – 66,0
ULF	Менше 0,015	Більше 66,0

Для тривалих записів використовують також додаткові компоненти – ультранизкочастотні (Ultra Low Frequency (ULF)). HF компонент пов'язаний з дихальними рухами і відображає вплив на роботу серця блукаючого нерва. LF компонент характеризує вплив на серцевий ритм як симпатичного відділу, так і парасимпатичного. VLF і ULF компоненти відображають дію різних факторів, до яких відносять, наприклад, судинний тонус, систему терморегуляції та ін. Важливими параметрами є також TF – загальна потужність спектра, індекс централізації IC (обчислюється за формулою $(HF + LF) / VLF$) і індекс вагосимпатичних взаємодій LF / HF. TF дозволяє оцінити сумарну активність впливів на ритм серця вегетативної нервової системи. LF / HF характеризує баланс впливу на серце парасимпатичного і симпатичного відділів.

При обробці сигналів зі змінними частотно-часовими параметрами найбільш перспективним у наш час є використання вейвлет-аналізу, а саме вейвлет-перетворення, яке має безсумнівні переваги перед іншими. Перетворення Фур'є, яке часто використовується, представляє сигнал, заданий в часовій області у вигляді розкладання за ортогональними базисними функціями (синусам і косинусам), виділяючи частотні компоненти. Недолік перетворення Фур'є полягає в тому, що частотні компоненти не можуть бути локалізовані в часі. Це обумовлює його застосовність тільки до аналізу стаціонарних сигналів.

Більшість медичних сигналів має складні частотно-часові характеристики. Часто такі сигнали складаються з близьких за часом, короткоживучих високочастотних компонентів і довготривалих, близьких за частотою до низькочастотних компонентів [4].

Для аналізу таких сигналів потрібен метод, що забезпечує хороше дозвіл по частоті і по часу. Перше потрібно для локалізації низькочастотних складових, друге – для дозволу компонентів високої частоти. У разі вейвлет-перетворення нестационарний сигнал аналізується шляхом розкладання по базисних функціях, отриманим з деякого прототипу шляхом стиснень, розтягнень і зсувів. Розрізняють дискретне і безперервне Вейвлет-перетворення, які можна застосовувати як для безперервних, так і для дискретних сигналів. Сигнал аналізується шляхом розкладання по базисних функціях, отриманим з деякого прототипу. Функція-прототип називається (материнським) вейвлетом.

Метод моніторингу ЕКГ є одним з найважливіших неінвазивних інструментів діагностики серцевих захворювань. В наш час значного поширення та вдосконалення набула телекомунікаційна інфраструктура. Представлена велика кількість підходів, спрямованих на розвиток телеметричних кардіологічних пристроїв. Телеметричні пристрої ЕКГ дозволяють легко і швидко контролювати ЕКГ пацієнтів з підозрою на серцеві дисфункції. Сучасні системи аналізу ВСР дозволяють отримувати зображення спектрограм через певні проміжки часу для оцінки динаміки компонентів спектра під час дослідження [5].

В наш час розроблена велика кількість апаратно-програмних комплексів для реалізації методики кардіоінтервалографії («Варікард», «Віта-Ритм», «ВНС-Ритм», «ВНС-Віта» і «ВНС-Спектр», «Нейрософт», «Карди»). Враховуючи сучасні реалії поряд із якістю одержуваних результатів та функціональними можливостями апаратів одним із важливих аспектів є їх ціна. Всі зазначені апаратно-програмні комплекси працюють спільно з комп'ютером і забезпечують формування динамічних рядів кардіоінтервалів з частотою дискретизації електрокардіографічного сигналу до 1000 Гц і вище. Точність вимірювання RR-інтервалів ± 1 мс. Проте в сучасних реаліях актуальним є проведення моніторингу стану пацієнта в амбулаторних умовах. Пацієнти з серцевими проблемами, а також здорові люди тепер можуть реєструвати сигнали ЕКГ і відправляти їх лікарям або медичним центрам з використанням телекомунікаційних технологій, що дозволяє включити запис ЕКГ незалежно від місця і часу [6]. З'явилися різні пристрої, які забезпечують зручність у повсякденному використанні при носінні на ремнях чи під одягом. За останні кілька років з'явилося безліч додатків для вимірювання ЕКГ з використанням смартфонів або спеціалізованих портативних приладів. Однак якість записаних сигналів залишається основною перешкодою для заміщення сигналів, записаних стандартними мокрими адгезивними електродами, які як і раніше є переважними для довготривалого запису. Погана якість сигналу і, як наслідок, низька клінічна значимість є основною причиною нечіткої класифікації та помилкової інтерпретації серцевих скорочень з артефактами. Тому використання смартфонів є недоцільним та немає функціонального обґрунтування.



Рис. 1. Діаграма принципних компонентів апаратно-програмного комплексу для моніторингового аналізу ритмограм

Ми пропонуємо використання сучасних апаратно-програмних комплексів, що засновані на

використанні бездротових технологій, що могли б містити як довгострокові, так і короткотривалі режими запису та могли проводити моніторинговий аналіз ритмограм за дисперсією. При виході за межі норми вони могли б забезпечувати передачу інформації на сервер для збирання даних та подальшу відправку в медичний заклад для детального аналізу (рис. 1).

Висновки

Теоретичні основи аналізу ВСР повинні служити завданням клінікофізіологічної інтерпретації результатів досліджень. Успіх впровадження нової методології в практику багато в чому залежить від наявності адекватних технічних засобів. Аналіз ВСР пов'язаний з використанням апаратно-програмних комплексів, які повинні забезпечити надійний знімання інформації, надійне розпізнавання та вимірювання кардіоінтервалів з побудовою тимчасових динамічних рядів і застосування до них стандартизованих математичних процедур аналізу. Використання апарату вейвлет-аналізу для обробки медичної інформації є найбільш перспективним у порівнянні з іншими методами. Саме його використання дозволяє виявити ключові діагностичні ознаки і отримати частотно-часову характеристику досліджуваного сигналу.

Література

1. R. Baevskii, "Analysis of heart rate variability in space medicine. Fiziol Cheloveka", 2002, pp.70–82.
2. L.Mainardi, "On the quantification of heart rate variability spectral parameters using time-frequency and time-varying methods", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 367, no. 1887, pp. 255-275, 2009.
3. E. Miranda Dantas, M. Lima Sant'Anna, R. VarejãoAndreão, C. Pereira Gonçalves, E. AguiarMorra, M. PerimBaldo, S. Lamêgo Rodrigues and J. Geraldo Mill, "Spectral analysis of heart rate variability with the autoregressive method: What model order to choose?", Computers in Biology and Medicine, vol. 42, no. 2, pp. 164-170, 2012.
4. Sobko A., Kozyar V., Khudetsky I., Antonova-Rafi Y. The method of evaluation bioelectric activity of the brain in the study of electroencephalography /14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018 pp.326-329.
5. Анализ variability сердечного ритма: эволюционно-эпистемологический аспект. Размышление над книгой: Ардашев А. В., Лоскутов А. Ю. Практические аспекты современных методов анализа variability сердечного ритма, ИД «Медпрактика-М», vol. 1-219-20, pp. 414-416, 2018.
6. Л. Шилович, "Перспективы диагностического применения метода анализа variability сердечного ритма в спорте (обзор литературы)", Проблемы здоровья и экологии, pp. 59-63, 2012.

References

1. R. Baevskii, "Analysis of heart rate variability in space medicine. Fiziol Cheloveka", 2002, pp.70–82.
2. L.Mainardi, "On the quantification of heart rate variability spectral parameters using time-frequency and time-varying methods", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 367, no. 1887, pp. 255-275, 2009.
3. E. Miranda Dantas, M. Lima Sant'Anna, R. VarejãoAndreão, C. Pereira Gonçalves, E. AguiarMorra, M. PerimBaldo, S. Lamêgo Rodrigues and J. Geraldo Mill, "Spectral analysis of heart rate variability with the autoregressive method: What model order to choose?", Computers in Biology and Medicine, vol. 42, no. 2, pp. 164-170, 2012.
4. Sobko A., Kozyar V., Khudetsky I., Antonova-Rafi Y. The method of evaluation bioelectric activity of the brain in the study of electroencephalography /14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018 pp.326-329.
5. Analisis variability serdechnogo ritma: evolutsionno-epistemologicheskyy aspekt. Razmishleniye nad knigoy: Ardashev A. V., Loskutov A. Yu. Prakticheskiye aspekty sovremennykh metodov analiza variability serdechnogo rithma, ID «Medpraktika-M», vol. 1-219-20, pp. 414-416, 2018.
6. L. Shilovich, "Perspektivi diagnosticheskogo primeneniya metoda analiza variability serdechnogo rithma v sporte (obzor literatury)", Problemy zdoroviya I ecologii, pp. 59-63, 2012.

Рецензія/Peer review : 10.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сидорець В.М.