

АНАЛИЗ НА ВАРИАБИЛНОСТТА НА СЪРДЕЧНАТА ЧЕСТОТА С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФСКИ И ЕЛЕКТРОКАРДИОГРАФСКИ СИГНАЛИ

ANALYSIS OF HEART RATE VARIABILITY USING PHOTOPLETISMOGRAPHIC AND ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNALS

Mitko Gospodinov, Evgeniya Gospodinova, Penio Lebamovski

Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences

mitgo@abv.bg, jenigospodinova@abv.bg, p.lebamovski@abv.bg

Abstract

Heart rate variability (HRV) is a non-invasive marker for monitoring the physiological condition of patients and assisting in the diagnosis of cardiovascular disease. The aim of this study was to investigate the consistency between HRV parameters based on photoplethysmographic (PPG) and electrocardiographic (ECG) signals. Parameters from the linear analysis in the time domain were studied. The time domain indices are standardized and widely used to calculate HRV. These indices are statistical and geometric measurements. The statistical calculations of the successive heart rate intervals (RR interval series) are strictly interrelated (SDNN, SDANN, RMSSD, pNN50), while geometric measurements are based on TINN and HRVTi parameters. The ECG and PPG signals of a healthy individual were examined. The obtained results show a very good agreement between the HRV parameters obtained from the two types of signals. In view of this finding, it can be concluded that the PPG offers an alternative ECG option for HRV analysis without compromising accuracy. The correspondence between the studied parameters applied to the two types of signals provides potential support for the idea of using PPG instead of ECG in the extraction and analysis of HRV in outpatient cardiac monitoring of healthy individuals and patients with cardiovascular disease. A study of two groups of individuals: healthy and with cardiovascular disease based on PPG signals by applying the method: analysis in the time domain. The obtained results show that with the used method the two studied groups of subjects can be distinguished.

Keywords: Heart Rate Variability, Time-Domain Analysis, Photoplethysmographic signal, Electrographic signal

ВЪВЕДЕНИЕ

Биомедицинските сигнали са физически проявления на физиологичните процеси, протичащи в човешкия организъм, които могат да бъдат измерени и представени под форма, удобна за обработка по електронен път. Обработката на биосигналите се извършва с цел да се получат информативни данни от гледна точка на медицинската диагностика или с цел да се определят диагностичните показатели на биосигнала. Познаването на параметрите и характеристиките на биологичните сигнали допълва клиничната картина на заболяването с обективна диагностична информация, което позволява да се прогнозира развитието на състоянието на пациента.

Портативните устройства имат повишени диагностични възможности в сравнение със стационарните средства за анализ на биосигналите. За тяхната работа е необходимо усъвършенстване на класическите средства и алгоритми за регистриране и обработка на сигналите, както и работата им в условия на свободна двигателна активност. Най-често използваните биомедицински сигнали в портативните устройства са: електрокардиографски (ЕКГ), фотоплетизмографски (ФП) и др.

Портативните устройства за диагностика на сърдечно-съдови заболявания са сред най-търсените медицински устройства [5]. Прилагането на иновации в тази област ще доведе до широко използване на този вид устройства с цел намаляване на смъртността от сърдечно-съдови заболявания.

При портативните ЕКГ устройства, сигналите обикновено се измерват или с електроди за еднократна употреба, прикрепени към тялото на пациента или с текстилни електроди поставени на гръдния кош [6]. И двата вида електроди могат да причинят на пациентите дискомфорт, неудобство, дори алергични реакции [6]. ЕКГ сигналите се влияят от различни източници на шум и артефакти [7]. В допълнение, морфологичните вариации в ЕКГ сигнала могат да повлияят на разпознаването на R вълните [8]. Поради тези недостатъци, ФП сигналът е въведен като алтернатива на ЕКГ и се използва в редица приложения, като модерна, неинвазивна техника за регистриране на измененията в обема на кръвта в кръвоносните съдове [9]. Компютърната диагностика на регистрираните ФП сигнали чрез портативно устройството се осъществява на базата на анализа на времевите серии, състоящи се от нормални интервали между сърдечните пулсации. Промените на интервалите между сърдечните удари са известни като вариабилност на сърдечната честота (ВСЧ).

Целта на това проучване е да се изследва съгласуваността между параметрите от линейния анализ във времевата област на ВСЧ, на базата на фотоплетизмографски и електрокардиографски сигнали.

СРАВНЕНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ЕКГ И ФП СЕНЗОРИ

За регистрация и измерване на биомедицинските сигнали, като ЕКГ и ФП се използват сензори, съдържащи чувствителни елементи, които преобразуват изследвания физиологичен процес в електрически или оптически сигнал. Общи характеристики на двата типа сензори са миниатюрните им размери, ниска консумация на енергия, висока чувствителност, което ги прави най-масовите сензори, използвани в последно време за създаване на портативни, преносими устройства за продължителен мониторинг на сърдечната дейност [10]. Чрез интеграцията им със съвременните персонални комуникационни устройства от типа на смартфоните, те позволяват създаване на персонални информационни системи за следене на кардиологичния статус на всеки индивид.

Известни са разликите между физическите принципи, използвани при ЕКГ и ФП сензорни устройства за регистрация на физиологични данни. Сред различните физически принципи ще отбележим само следните по-важни специфики на регистрираните сигнали:

- Електрокардиографията е метод за изследване на електрическата активност на сърцето, осъществяван чрез регистриране и последваща обработка на електрокардиограма. Използва се в монитори за визуално наблюдение на ЕКГ и диагностика на нарушения, за проследяване на показателите за вариабилност на сърдечния ритъм, отразяващи състоянието на регулаторните процеси в организма.
- Фотоплетизмографията е метод за изследване на периферната хемодинамика, основан на изследване на абсорбцията на светлина, преминаваща през изследваното място на тъканите с пулсираща кръв. Използва се в монитори на пациенти за определяне на сърдечната честота, стойността на интензивността на пулсацията на кръвния поток, както и в пулсовите оксиметри.
- Вариабилността на сърдечната честота може надеждно да се извлече от ЕКГ сигналите, тъй като R-R интервалите могат да бъдат определени с точност от милисекунди, така че да могат да се получат значими ВСЧ данни при краткотрайни измервания. При използване на ФП сензорите, точността на P-P интервалите е

ограничена от честотата на дискретизация поради високата консумация на енергия на светодиодите.

- При използване на ФП сензори се констатира, че интервалите на вариацията на пулсовата честота корелира с ВСЧ за по-дълги периоди на измерване (> 5 минути). Краткотрайното измерване не дава необходимата точност.
- ЕКГ сензорите не изискват дълго време за установяване, така че съществените показания могат да се получат много скоро след стартиране. ФП сензори изискват относително дълго време за установяване поради необходимостта от измерване на количеството околна светлина и изчисляване на компенсацията, необходима за отмяна на ефекта. ФП сензори могат също да изискват компенсация на артефактите на движението, за да се получи коректно четене.
- ЕКГ сензорите изискват изключително ниска енергийна консумация, което позволява регистриращото устройство, например холтер, да работи продължително време – 24, 48 часа. ФП сензори имат около 10 пъти по-висока консумация, което намалява времето за ефективен мониторинг.
- Въпреки по-слабата чувствителност и влияние от околната среда ФП сензори са по-удобни за монтиране към ръка, пръст, ухо или други части на тялото, в сравнение с ЕКГ, което не влияе върху комфорта на личността при поставяне, използване и снемане от тялото на пациента. Дискомфорт от използване на ЕКГ сензори възниква не само при поставяне и снемане, но и поради възможност от проява на алергична реакция на местата на електродите.

Поради описаните различия, използването на персонални устройства – холтери, часовници, гривни и други само с един тип сензор понижава надеждността на следене на кардиологичното състояние, поради възможната поява на артефакти и прекъсване на процеса на регистрация на сърдечния пулс. Това е причината, поради която в последно време научни изследвания и разработки са насочени към създаване на преносими информационни системи с повече от един тип сензори. Те се базират и на научните изследвания върху прецизността на регистриране на сърдечния ритъм с цел последващи анализи на физиологичните параметри, свързани с определяне на ВСЧ с помощта на специализиран софтуер. Настоящият период може да се характеризира като първа вълна на създаване на разнообразни персонални регистратори на сърдечната честота - смарт часовници, верижки, пръстени, уреди за китки, за чело, за ръце и други.

МЕТОД НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

За изследване на ВСЧ се използват два вида математически методи: линейни и нелинейни [2, 3, 4]. В настоящата статия, изследванията са направени на базата на метода, извършващ анализ във времевата област, принадлежащ към групата на линейните методи [1, 2]. Параметрите, които се определят чрез този метод са обособени в две групи: статистически и геометрични измервания.

Параметрите, принадлежащи към статистическите измервания са следните:

- SDNN - определя се въз основа на нормалните NN интервали, като се изчислява тяхното стандартно отклонение. Колкото по-дълго трае изследването на вариабилността на сърдечната честота, толкова повече обща вариабилност се натрупва. Затова не могат да се сравняват SDNN резултатите от изследвания с различна продължителност.

- SDANN – за да се определи този параметър, се изчисляват средните стойности на нормалните RR интервали за всеки 5 минути от изследването и се пресмята тяхното стандартно отклонение. Това дава представа доколко сърдечната честота за 5-минутните периоди се различава от общата средна стойност за целия период на изследването.
- RMSSD – с този параметър се определя средно квадратичното на разликите между всеки два последователни нормални RR интервала, като отразява бързите (висококототните промени) на вариабилността на сърдечната честота.
- pNN50% - процента на последователните интервали, които се различават с повече от 50 ms. Този параметър отразява бързите (висококототни промени) на вариабилността на сърдечната честота, понеже се определя от съседни интервали.
- pNN50 - броят на последователните интервали, които се различават с повече от 50 ms.

Параметрите, принадлежащи към геометричните измервания са следните:

- TINN - разпределението на RR интервалите се апроксимира до триъгълник и се измерва основата му в милисекунди.
- HRVTi - начертава се хистограма на RR интервалите през 7,8125 ms. Общият брой на RR интервалите се разделя на височината на пика на хистограмата.

Предимствата от използването на геометричните параметри са следните:

- Слабо се влияят от екстрасистолите и ако измервателното устройство не успее правилно да разпознае и отстрани екстрасистолите, това няма да доведе до чувствителни промени в резултата. Тези параметри се явяват алтернатива на статистическите параметри, които не се получават лесно;
- Позволяват образно представяне на разпределението на RR интервалите.

Ограничението на геометричните параметри е, че необходимото време за запис трябва да бъде най-малко 20 минути, което означава, че краткосрочните записи не могат да бъдат оценени с тях.

РЕЗУЛТАТИ

В Таблица 1 са показани резултатите от сравнителния анализ на два вида сигнали на здрав индивид: ЕКГ и ФП, по отношение на параметъра точност. Определена е относителната грешка между двата вида сигнали и тя е по-малка от 2.8% за изследваните параметри. Следователно, регистрираните ФП сигнали, чрез разработеното ново ФП устройство са съизмериме със сигналите, регистрирани с ЕКГ и ФП устройства могат да се използват като алтернатива на ЕКГ устройства.

В Таблица 2 са показани резултатите от сравнителния анализ на две групи пациенти: 5 здрави индивида (Група 1) и 5 пациента със сърдечно-съдово заболяване-аритмия (Група 2). Сигналите са регистрирани чрез ФП устройство и са с продължителност 2 часа. Чрез статистическия метод ANOVA е определена стойността на p параметъра на изследваните параметри, отчитаща статистическата значимост. Изследваните параметри имат статистическа значимост, ако стойността на p параметъра е < 0.05 . Всички изследвани параметри, с изключение на Mean RR имат статистическа значимост, като p-стойността е по-малка от 0.0001. Следователно, с използваните параметри, принадлежащи към метода, извършващ анализ във времевата област могат

да се разграничават болни от здрави пациенти, т.е. да се извършва диагностициране и прогнозиране на сърдечно-съдови заболявания.

Таблица 1: Сравнителен анализ между ЕКГ и ФП сигнали на здрав субект

Параметри	ЕКГ сигнал	ФП сигнал	Отн. грешка [%]
<i>Статистически измервания</i>			
Mean RR (PP) [ms]	1122	1100	2.0%
SDNN [ms]	95.1	94.2	0.9%
SDANN [ms]	82.1	82.8	0.8%
pNN50 [number]	186.1	187.0	0.5%
pNN50 [%]	3.5	3.5	2,8%
RMSSD [ms]	20	19.8	1.0%
<i>Геометрични измервания</i>			
HRVTi [number]	19.7	19.9	1.0%
TINN [ms]	390	391	0.2%

Таблица 2: Сравнителен анализ между ФП сигнали на здрави (Група1) и болни (Група2) субекти

Параметри	Група 1 (mean \pm SD)	Група 2 (mean \pm SD)	P- стойност
<i>Статистически измервания</i>			
Mean RR [ms]	1133.9 \pm 177.8	1066.1 \pm 65.8	0.1
SDNN [ms]	97.2 \pm 20.8	52.0 \pm 20.3	0.0001
SDANN [ms]	82.3 \pm 17.9	40.5 \pm 18.1	0.0001
pNN50 [number]	187.0 \pm 255.2	2790.8 \pm 1265.6	0.0001
pNN50 [%]	3.4 \pm 5.2	40.2 \pm 20.3	0.0001
RMSSD [ms]	21.0 \pm 10.8	72.4 \pm 29.1	0.0001
<i>Геометрични измервания</i>			
HRVTi [number]	19.6 \pm 1.4	14.6 \pm 1.6	0.0001
TINN [ms]	387.7 \pm 65.1	222.2 \pm 99.2	0.0001

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преносимите устройства за сърдечно-съдова диагностика са сред най-търсените медицински устройства. Прилагането на иновации в тази област ще доведе до широкото използване на тези устройства с цел намаляване на смъртността от сърдечно-съдови заболявания. Резултатите от направеното изследване показва, че регистрираните сигнали от ЕКГ и ФП сензори са идентични, като относителната грешка между тях е по-малка от 2.8% и ФП устройства могат да се използват като алтернатива на ЕКГ устройствата. От сравнителния анализ между ФП сигнали на здрави и болни субекти чрез прилагането на метода: анализ във времевата област

показва, че с този метод могат да се разграничават болни от здрави пациенти и с него да се извършва диагностициране и прогнозиране на сърдечно-съдови заболявания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научното изследване е проведено като част от проекта „Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на кардиологични данни“ по договор № КП-06-Н22/5 от 07.12.2018 г., финансиран от Фонд „Научни Изследвания“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Georgieva-Tsaneva, G.. “Investigation of Heart Rate Variability by Statistical Methods and Detrended Fluctuation Analysis”. CBU International Conference Proceedings, 7, 2019, DOI:10.12955/cbup.v7.1446, 729-734 <https://ojs.journals.cz/index.php/CBUIC/article/view/1446>.
- [2] Georgieva-Tsaneva, G. “Wavelet Based Method for Non-Stationary Time Series Processing”. In: CompSysTech'20: Proceedings of the 21st International Conference on Computer Systems and Technologies, ACM International Conference Proceeding Series, June 2020, pp.122-128, <https://doi.org/10.1145/3407982.3408008>
- [3] Gospodinova, E., “GRAPHICAL METHODS FOR NON-LINEAR ANALYSIS OF ELECTROCARDIOGRAPHIC DATA”. CBU International Conference Proceedings 2019: Innovations in Science and Education, Vol. 7, 2019, DOI:<https://doi.org/10.12955/cbup.v7.1497>, 864-869 <https://ojs.journals.cz/index.php/CBUIC/article/view/1497/2033>.
- [4] Gospodinova, E., “Time Series Analysis Using Fractal and Multifractal Methods”. CompSysTech'19 Proceedings of the 20th International Conference on Computer Systems and Technologies, ACM New York, NY, USA, 2019, ISBN:978-1-4503-7149-0, DOI:<https://doi.org/10.1145/3345252.3345265>.
- [5] Hsiao, C., Hsu, F., Lee, R., Lin, R. "Correlation analysis of heart rate variability between PPG and ECG for wearable devices in different postures," 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2017, pp. 2957-2962, doi: 10.1109/SMC.2017.8123077.
- [6] Jan, HY., Chen, MF., Fu, TC. et al. “Evaluation of Coherence Between ECG and PPG Derived Parameters on Heart Rate Variability and Respiration in Healthy Volunteers With/Without Controlled Breathing”, J. Med. Biol. Eng. 39, 783–795 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40846-019-00468-9>.
- [7] Pereira, T., Tran, N., Gadhoumi, K. et al. “Photoplethysmography based atrial fibrillation detection: a review”. npj Digit. Med. 3, 3 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0207-9>.
- [8] Shin, W., Cha, Y.D., Yoon, G. “ECG/PPG integer signal processing for a ubiquitous health monitoring system”. Journal of Medical systems 34(5), 891-898 (2010).
- [9] Vidhya, V., Unnikrishnan, D. "Synthetic ECG and PPG signal generation using pulse shaping technique," 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443256.
- [10] Todorov, T., Bogdanova, G., Noev, N., Sabev, N. “Data management in a Holter Monitoring System”, TEM Journal, Vol.8, No.3, pp. 801-805.