

АЛГОРИТМИ ЗА АНАЛИЗ НА КАРДИОЛОГИЧНИ ДАННИ, БАЗИРАНИ НА УЕЙВЛЕТ ТЕОРИЯ

CARDIOLOGICAL DATA ANALYSIS ALGORITHMS BASED ON WAVELET THEORY

Galya Georgieva-Tsaneva

Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences

e-mail: galitsaneva@abv.bg

Abstract

The report presents tools for analyzing cardiac data using various wavelet transforms. Algorithms for the analysis of heart rate variability, which is a dynamic, non-stationary variable, are presented. Heart rate analysis with mathematically based methods is a topical issue. Electrocardiography and long-term Holter recordings have established themselves as non-invasive medical methods for assessing cardiovascular activity. In the time domain parameters established in practice are determined. Spectral analysis of heart rate variability makes it possible to assess the work of the heart and to assess its condition in the coming days. Spectral analysis is usually performed in three frequency bands and can be done by different mathematical methods. The analyzes were performed on real long-term Holter records for patients with proven heart disease diagnosed by a cardiologist and for people without cardiovascular problems. The presented numerical and graphical results were obtained with the help of the MATLAB software program. Comparative analyzes show differences in the studied frequency parameters between patients with heart disease and healthy individuals. The research performed and the results obtained can be useful in the clinical practice of cardiologists.

Keywords: long-term Holter records, heart rate variability, cardiac data, wavelet transforms.

ВЪВЕДЕНИЕ

Множество научни изследвания върху смъртността, предизвикана от сърдечносъдови заболявания (включително внезапна сърдечна смърт), проведени през последните години, показват връзка с работата на вегетативната нервна система [1]. Диагностиката на сърдечно-съдовата система се извършва чрез кардиологични записи, получавани с електрокардиограф, фотоплетизмографско устройство или холтер [8, 9, 10]. Работата на много изследователи от различни страни в продължение на години доказват повишена честота на както на общата смъртност така и на настъпили сърдечни събития както при видимо здрави хора на средна възраст, така и при възрастни хора, както и при пациенти след миокарден инфаркт, които имат намалена вариабилност на сърдечната честота (HRV). Намалената HRV е отражение на повишената симпатикова активност. Това е състояние, което може да намали прага на фибрилация и по този начин да предразположи към камерно мъждене [2]. Намален парасимпатиков тонус или симпатиковата свръхстимулация довежда до намаляване на HRV и понижава прага за произхода на аритмии. Намалените нива на HRV са свързани с различни видове смъртност, повишена честота на настъпване на сърдечни събития (ангина пекторис, инфаркт на миокарда,

коронарна болест на сърцето, смърт или застойна сърдечна недостатъчност и риск от внезапна поява сърдечна смърт при асимптоматични индивиди [3].

Натрупани са емпирични доказателства за връзка между склонността към аритмии с летален характер и признаци на повишена симпатикова или намалена вагусна активност. Тези доказателства довеждат до увеличаване на усилията за разработване на количествени маркери на автономната дейност. HRV има потенциал да предостави допълнителен поглед върху патологичните и физиологичните състояния, предизвикани от влошена сърдечносъдова дейност [1]. Променливостта на сърдечната честота днес е един от най-обещаващите количествени маркери на автономна дейност. HRV е описан като вариации на двете RR интервали и моментален сърдечен ритъм [6]. Основата за варибилността на сърдечната честота като мярка за автономна модулация е, че парасимпатиковият клон на автономната нервна система (ANS) има много бърза тъканна реакция и бързо възстановяване от невронна стимулация, което позволява висока честота на невронна активност. Симпатиковата нервна система (SNS) има ниска честота на нервна активност, тъй като има много бавно начало на тъканната реакция и възстановяване от нервната стимулация. Предимно парасимпатиковият контрол на сърцето води до големи вариации в сърдечната честота поради бързото начало и възстановяване на парасимпатиковата система.

Променливостта на сърдечната честота може да бъде измерена по различни начини и един от тях е изследването ѝ в честотния домейн. При този метод се прави разлика между R-R интервалите, предизвикващи промени в честотна лента на симпатиковата нервна стимулация на сърцето (ниска честота) и в честотна лента на парасимпатиковата стимулация на сърцето (висока честота), използвайки инструментариума на математиката. Валидността на класифицирането на различни честоти към симпатична и парасимпатиковата активност на нервната система се основава на множество проучвания.

Доказано е, че упражненията водят до увеличаване на нискочестотния домейн и намаляване във високочестотния домейн, и като цяло до намаляване на общата мощност на честотния спектър. Резултатите от редица проучвания показват, че честотните домейни са подходящи за изследване и че трябва да се работи в посока дали лентите са променени или засегнати от определени състояния като патология, възраст и физическа дейност. В резултат на проведени изследвания се приема, че редовната физическа активност предизвиква адаптации в автономна нервна система.

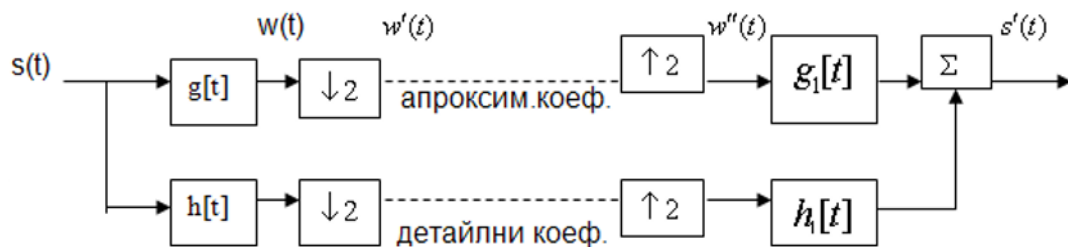
Целта на настоящата статия е да се представят получени резултати от изпълнението на проект „Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на кардиологични данни“, финансиран от Фонд Научни Изследвания, свързани със създаване и изследване на методи за математически анализ на кардиологични сигнали и данни. В статията са показани резултати, получени при времеви и честотен анализ на варибилността на сърдечната честота проведен върху реални дълговременни холтерни записи.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Уейвлет теорията [5] е подходяща за използване при анализа на нестационарни сигнали. Този анализ е посветен на извличане на характерни честоти, съдържащи се по съставен сигнал чрез последователни интервали между сериите RR интервали. Едно от съществените предимства на уейвлет анализа [7] е, че дадено явление може да се опише в едновременно и в честотната област, и във временната област. Това е различно от

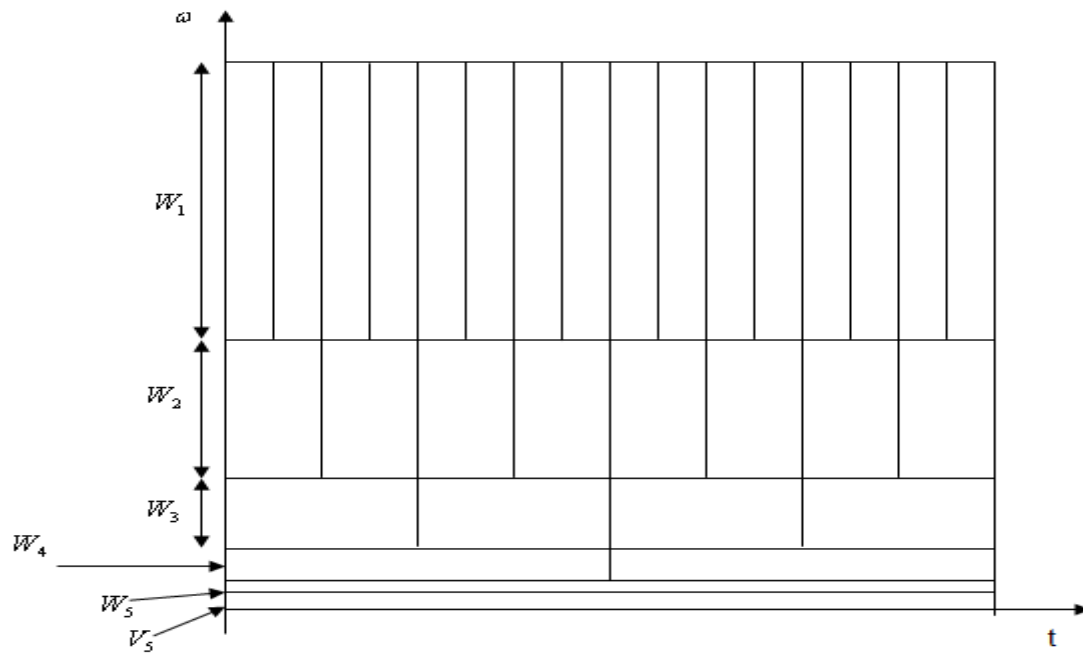
преобразуването на Фурие, при което явлението се описва или във времевата или в честотната област. Друга характеристика на уейвлет анализа е формата на уравнението за преобразуване на уейвлет. Той може да бъде проектиран така, че да отговаря на формата на анализирувания сигнал. Това позволява по-добро количествено измерване. По тази причина тази по-нова техника за анализ на вариабилността на сърдечния ритъм изглежда има предимства пред преобразуването на Фурие.

Уейвлет анализът приема за базисна функция кратковременни елементарни вълни, характеризиращи се с определен мащаб (честота) и локализация във времето, които вместо да се умножават по синуси и косинуси, се преместват, разтягат и свиват по оста на времето. Анализираният сигнал се представя като сума от такива кратковременни вълни с различен размер и местоположение. Мултирезолуционният анализ (Multiresolution Analysis - MRA) анализира сигнала при различни честоти с различни резолуции [4]. Процесите на декомпозиране и обратен синтез на изследвания сигнал посредством филтри (едно ниво на декомпозиция) са показани на фиг. 1. Със символите g_1 и h_1 са означените съответно инверсията нискочестотен и високочестотен филтър. Алгоритъмът може да се приложи рекурсивно към апроксимиращата част на сигнала и пирамидално да се повтори няколко пъти, според избраното ниво на декомпозиция, максимум n пъти (при дължина на сигнала $2n$). Уейвлет трансформациите са подходящи за използване при провеждане на анализ на нестационарни сигнали, каквито са електрокардиологичните сигнали. Традиционните трансформации на Фурие дават информация за спектралните съставки на сигналите, без обаче да конкретизират моментите във времето, в които тези съставки се появяват или изчезват. Уейвлет трансформацията има предимството да дава на едномерни сигнали двумерна зависимост, като при това времето и честотата се разглеждат като независими променливи.



Фигура 1. Уейвлет трансформация, декомпозиция и реконструкция

На фиг.2 е показано разделянето на спектъра на сигнал с дължина $L=32$ отчета при дискретна уейвлет декомпозиция до 5 ниво на разложение с филтри.



Фиг. 2 Индекс-спектър на сигнала при 5 нива на декомпозиция

Методите за измерване на автономната активност във времевата област (съответните параметри са представени в таблица 1) са най-прости за изпълнение. При тези методи се определя сърдечната честота във всеки момент от времето, определят се интервалите между тях отделелните сърдечни удари, изчисляват се последователните нормални комплекси. В един непрекъснат ЕКГ запис, всеки QRS комплекс се открива и така наречените нормални към нормални (NN) интервали (т.е. всички интервали между съседни QRS комплекси в резултат на деполаризацията на синусовия възел), определя се и моменталната сърдечна честота.

Уейвлет анализът на вариабилността на сърдечната честота чрез дискретна уейвлет трансформация се извършва по честотни диапазони. Изчислени са енергиите на уейвлет коефициентите по декомпозиционни нива, според правилото за определяне на уейвлет енергиен спектър, дефиниран като сума от квадратите на положителните стойности на съответните уейвлет коефициенти. Изчислената енергия по нива на декомпозиция на запис от реална база данни е показана в таблица 2.

Таблица 1. Статистически параметри във времевия домейн

Параметър	Формула	Описание
SDNN [ms]	$SDNN = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (NN_i - \overline{NN})^2}$	Стандартна девиация на нормалните интервали
SDANN [ms]	$SDANN = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (\overline{NN}_i - \overline{\overline{NN}})^2}$	Стандартна девиация на усреднените нормални интервали

RMSSD [ms]	$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^{K-1} (NN_{i+1} - \overline{NN})^2}$	Стандартна девиация на успешните сърдечни пулсации
SDNN index [ms]	$SDNN_{ind} = \frac{1}{K} \sum_{i=K}^K SDNN_i$	Средна стойност на нормалните интервали в 5 минутен сегмент

Определянето на глобалния уейвлет спектър за трите честотни диапазона: VLF (много нискочестотна), LF (нискочестотна), HF (високочестотна) се осъществява по следните зависимости:

$$E_{VLF} = E_{wt}(6) + E_{wt}(7);$$

$$E_{LF} = E_{wt}(5) + E_{wt}(4);$$

$$E_{HF} = E_{wt}(1) + E_{wt}(2) + E_{wt}(3).$$

В тези формули с $E_{wt}(i)$ е обозначена спектралната уейвлет енергия на i -то ниво на декомпозиция.

РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗИ

Представените таблични резултати са получени като резултат от създадена за целта програма на C++ в среда на Microsoft Visual Studio.

Спектралните параметри в честотната област се изчисляват за 5 минутен сегмент от данните (съобразно препоръките на Европейското кардиологично и Северно Американското електрофизиологично дружества [1]).

Изчислените стойности на енергията в трите честотни диапазона за двете изследвани групи са дадени в табл. 3. Получените резултатите са представени като средна стойност \pm стандартно отклонение (SD). Представена е енергията в отделните диапазони в абсолютни стойности (ms^2), в проценти (спрямо общата) и в нормални единици (n.u.), които представят относителната стойност на всеки енергетичен компонент към общата спектрална енергия минус стойността на компонентата VLF. Изчислено е и отношението LF/HF, даващо информация за симпатовагалния баланс в организма.

Табл. 2 Енергия по декомпозиционни нива

Ниво на декомпозиция	Спектрална енергия (ms^2)
1	0.1007
2	22.9094
3	78.1197
4	39.8472
5	12.5818
6	7.7308
7	16.9664

Табл. 3 Енергия по честотни диапазони

Параметри	Здрави индивиди n=4	Пациенти със сърдечна недостатъчност n=38	P value
VLF			
Макс. честота (Hz)	0.02	0.02	NS
Спектър (ms^2)	1628.5±201.3	1830.0±867.2	NS
Спектър (%)	0.427±0.052	0.62±0.29	NS
LF			
Макс. честота (Hz)	0.08	0.08	NS
Спектър (ms^2)	1372.16±108.14	542.37±509.24	<0.0001
Спектър (%)	0.36±0.028	0.18±0.17	<0.05 (0.043)
Спектър (н.е.)	0.63±0.05	0.47±0.15	<0.05 (0.042)
HF			
Макс. честота (Hz)	0.25	0.25	NS
Спектър (ms^2)	817.61±67.49	603.46±411.07	<0.005 (0.003)
Спектър (%)	0.21±0.018	0.20±0.14	NS
Спектър (н.е.)	0.37±0.03	0.53±0.35	NS
LF/HF (отн-е)	1.7±0.002	0.65±0.39	<0.0001

*Стойностите са представени като средна стойност \pm стандартно отклонение.
За статистическия анализ е използван ANOVA метод.
За статистически значими се приемат стойностите при P value < 0.05*

Спектралната енергия на сигнала при здравите индивиди (табл. 3) се получава в границите на нормалните стойности: $(1170 \pm 416) \text{ ms}^2$ за нискочестотния диапазон и $(975 \pm 203) \text{ ms}^2$ за високочестотния диапазон [1]. Получената спектрална енергия на сигнала в нискочестотния диапазон (измерена в абсолютни стойности, в проценти и в нормализирани единици) при пациенти със сърдечна недостатъчност е значително по-ниска (табл. 4.3) от колкото при здрави индивиди. При спектралната енергия във високочестотния диапазон, измерена в абсолютни стойности и в проценти при болните индивиди, също се отчитат занижени стойности спрямо тези на здравите индивиди. Намалените стойности на енергията в двата изследвани честотни диапазона е показател за намаляване на вариабилността на сърдечната честота при пациентите със сърдечна недостатъчност.

Резултатите от направения спектрален анализ, показват осреднена стойност 1.7 за отношението LF/HF при здравата контролна група, което е в препоръчаните граници от Стандарта за измерване, физиологична интерпретация и клинична употреба на вариабилността ($1.5 \div 2$) за здрави индивиди [1], докато получената стойност 0.65 на отношението на симпатовагалния баланс при болните индивиди е извън тези граници.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Докладът представя алгоритми за анализ на кардиологични данни, базирани на уейвлет трансформации. Анализите са извършени върху реални продължителни Holter записи които са неинвазивни методи за оценка на сърдечната дейност. Представените анализи се извършват във времевата и честотната област се определят. Анализите са извършени върху записи за пациенти със сърдечно заболяване, с поставена диагноза от кардиолог и за хора без сърдечно-съдови заболявания. Представените числени и графични резултати са получени с помощта на софтуерната програма MATLAB. Сравнителните анализи показват разлики в изследваните честотни параметри между пациенти със сърдечно заболяване и здравите индивиди. Проведените изследвания и получените резултати могат да бъдат използвани за подобряване на клиничната практика на кардиолозите.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Malik, M., (1996). Heart rate variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use: Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, vol.1(2).
- [2] A J Schuit 1, L G van Amelsvoort, T C Verheij, R D Rijneke, A C Maan, C A Swenne, E G Schouten, 1999, Exercise training and heart rate variability in older people, *Med Sci Sports Exerc.*, 31(6):816-21.

- [3] E L Melanson, 2000, Resting heart rate variability in men varying in habitual physical activity, *Med Sci Sports Exerc.* 2000 Nov;32(11):1894-901. doi: 10.1097/00005768-200011000-00012.
- [4] Popescu M., P. Cristea, A. Bezerianos, “Multiresolution distributed filtering: a novel technique that reduces the amount of data required in high resolution electrocardiography”, *Future Generation Comput. Syst.*, Vol. 15, pp. 195-209, 1999.
- [5] Sasikala P., R.S.D. Wahidabanu, “Robust R Peak and QRS detection in Electrocardiogram using Wavelet Transform”, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 1, No 6, 2010, pp. 48-53.
- [6] Tarvainen M.P., Niskanen J-P, Lipponen J.A., Ranta-aho P.O., Karjalainen P.A. “Kubios HRV – Heart Rate Variability analysis software”, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 113, Issue 1, 2014, pp. 210-220.
- [7] Jawal G., R.Parmar, A.Kaul. “QRS Detection using WT”. *IJEAT*, Vol. 1, No 6, pp.1-5, 2012.
- [8] Krasimir Cheshmedzhiev, 2020, A Photoplethysmography Signals Registering Device, In processing: Scientific conference with international participation STEMEDU-2020, Veliko Tarnovo, pp. 13-20. (in Bulgarian)
- [9] Evgeniya Gospodinova, 2020, Application Of Methods From Nonlinear Dynamics For Heart Rate Variability Analysis, In processing: Scientific conference with international participation STEMEDU-2020, Veliko Tarnovo, pp. 28-35. (in Bulgarian)
- [10] Todorov T., Bogdanova G., Noev N., Sabev N. (2019). Data management in a Holter Monitoring System, *TEM Journal*, 8(3), 801-805.