

MATHEMATICAL TOOLS FOR SIMULATING PHOTOPLETHISMOGRAPHIC SIGNALS

Krasimir Cheshmedzhiev

Institute of Robotics - Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria
cheshmedzhiev@gmail.com

Galya Georgieva-Tsaneva

*Institute of Robotics - Bulgarian Academy of
Sciences, Bulgaria*
galitsaneva@gmail.com

Yoan-Aleksandar Tsanev

Technical University - Varna, Bulgaria
joan.al2001@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКИ ИНСТРУМЕНТИ ЗА СИМУЛИРАНЕ НА ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФСКИ СИГНАЛИ

Abstract

The article presents an algorithm for modeling a photoplethysmographic signal using mathematical equations generating the basic waveforms. Photoplethysmographic signals are recorded by sensors recording changes in light intensity and are used in modern scientific research to conduct an effective mathematical analysis of heart rate variability. The article presents the results of conducted studies of the statistical parameters of the synthesized photoplethysmographic signal. The synthesis time of photoplethysmographic series of different lengths was analyzed.

Keywords: *Sensor; Simulations; Mathematical Analysis.*

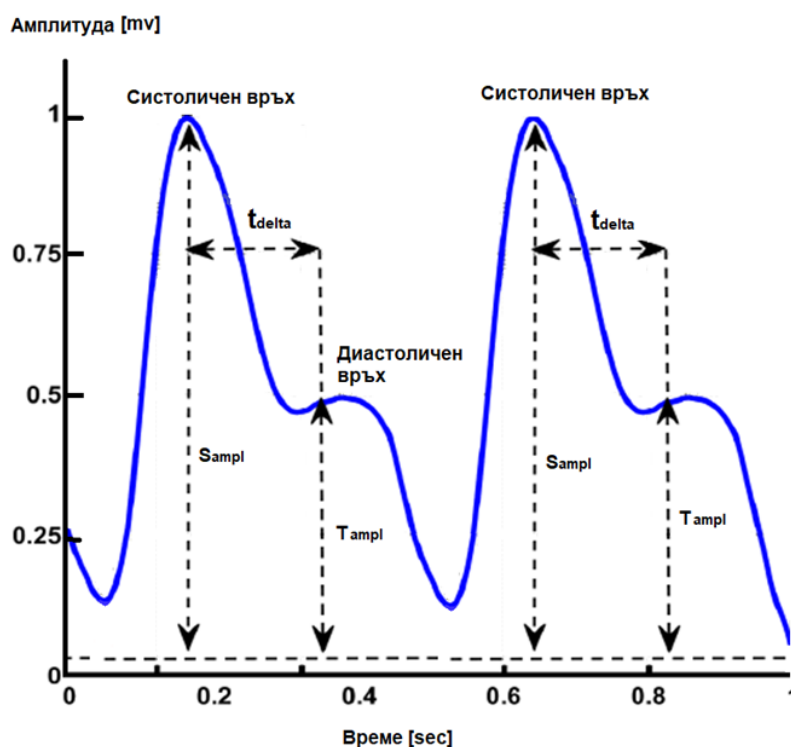
ВЪВЕДЕНИЕ

Симулирането на биомедицински нестационарни сигнали е предизвикателство за математическото моделиране. Тези модели могат да бъдат използвани в приложения като модел базирано филтриране, компресиране, извличане на основни характеристики, класификация на сигналите, изследване на зависимостите между различни кардио сигнали. Образуването на физическата форма на фотоплетизмографския сигнал (photoplethysmographic signal – PPG) се дължи на наслабяването на систолна и отразена вълна при работата на сърцето. Автономната нервна система има пряко отражение върху дейността на сърцето и следователно оказва влияние на формата на PPG сигнала. Наблюдението на сърдечната дейност трябва да се съпровожда от подходящи методи за нейната оценка. Вариабилността на сърдечната честота (ВСЧ) е подходящ неинвазивен метод [1], [2] за изследване динамиката на интервалите между сърдечните пулсации. Максималните амплитудни отклонения при PPG сигнала се отбелязват с Р върхове. Изследванията показват, че високите стойности на ВСЧ показват добро здраве, докато ниските стойности са свързани с умора, стрес и дори психически неразположения. Десетилетия наред електрокардиограмата е била използвана за определяне на сърдечен ритъм и за получаване на информация за откриване на аномалии и диагностициране на сърдечни заболявания. Въпреки че ЕКГ-базирания мониторинг на сърдечната честота в биомедицинските системи е широко използван и подобряван през годините, той не осигурява достатъчно гъвкавост и преносимост на потребителя. Този проблем може да бъде решен чрез използване на фотоплетизмографски сензори. PPG сензорите се базират на светлинна технология, чрез която се установят количествените измерения на

промените в обема на артериалната кръв в ограничено пространство (например върха на пръста) като следствие от работата на сърцето.

PPG сензорите откриват разликите или промените в интензитета на светлината чрез отражение или преминаване през тъканта. Тези разлики са свързани с промените в кръвообращението и могат да помогнат при откриването на свързаната със сърцето информация за работата на сърдечно-съдовата система.

На фигура 1 е показана схемата на фотоплетизмографския сигнал с неговите характерни точки, отразяващи стойностите на систоличното и диастоличното кръвно налягане. Систоличният връх е връх с максимално амплитудно отклонения (известен също като връх Р) и диастоличен връх, който е по-нисък от систоличния връх и го следва. На фигурата е обозначен и времевия интервал между систоличния връх и точката на прегъване (обозначен с t_{delta}).



Фиг. 1. Форма на фотоплетизмографска вълна [3].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Математическото моделиране на сигнали е мощен инструмент, който може да предостави модели на биомедицински сигнали, които:

- обобщават свойствата на разнородни сигнали, притежаващи общи характеристики;
- могат да се използват за симулиране на нормални или патологични сигнали, или да се покаже развитието на дадено заболяване чрез лесна промяна на параметрите на модела;
- да заменят липсващи епохи при неуспешни регистрирания на сигналите; да предоставят обща референтна рамка за сравняване на сигнали на пациенти с различни заболявания (когато става въпрос за моделиране на биомедицински сигнали) и изграждане на автоматични диагностични помощни системи;

- да се използват за сравнителен анализ за тестване на множество техники за обработка на биомедицински сигнали при контролирани нива на изкривяване или шум с различни честоти на семплиране.

С помощта на математическите модели на биомедицинските сигнали могат да се тестват различни алгоритми за обработка на тези данни.

Съществуват различни подходи за моделиране на фотоплетизмографски сигнали, като някои характерни подходи са описани например в изследвания [4] (авторите използват за създаване на модела на сигнала авторегресивна пълзяща средна от 5-ти ред – Autoregressive Moving-average (ARMA) модел и провеждат изследване на диапазоните на грешките при направеното моделиране) и [5] (авторите прилагат мулти-гаусово напасване за форма на импулсна вълна с помощта на Weighted LeastSquares и многокритериален метод за вземане на решения).

Предложеният от авторите в настоящата статия модел е базиран основно на математическите функции експонента и синус, с които се синтезират всички отделно обособени части на формата на PPG сигнала.

Използваните формули при синтезирането на фотоплетизмографския сигнал се базират на основния вид на формата на сигнала и имат вида:

- (1) $y = A \cdot \sin(2\pi f t + \alpha)$
- (2) $y = a t^2 + b$
- (3) $y = a t k + b, k = 1, 2, 3 \dots$

Където:

f – честота;

t – време;

a – амплитуда.

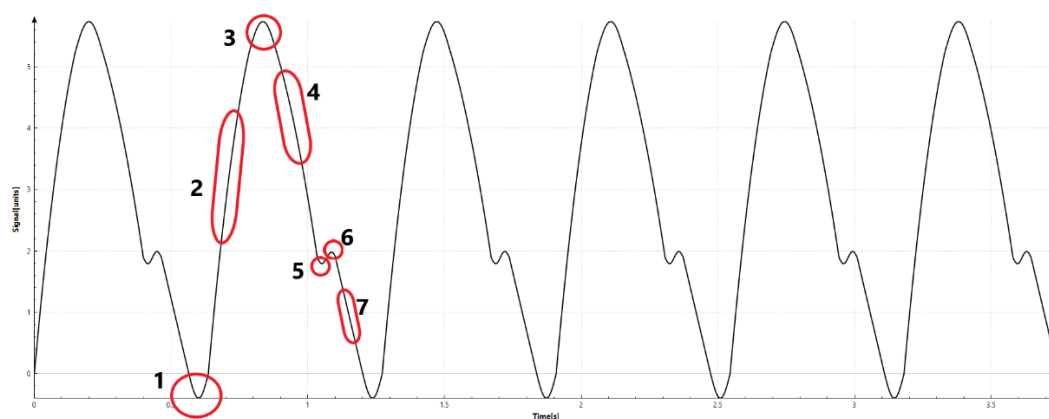
A, b, α – коефициенти.

АЛГОРИТЪМ

За реализация на представения модел е направена демонстрационна програма на езика C/C++. Използвана е библиотеката QT [6] и развойната среда Visual studio [7]. Алгоритъмът се състои от следните стъпки:

- Инициализиране на входните параметри A, f, α, a, b ;
- Избор на дължината на синтезираните данни (N);
- Реализиране на представения математически модел (у като функция на времето t);
- Изчисляване на оценъчните параметри на алгоритъма.

За целите на реализацията на представения алгоритъм, фотоплетизмографският сигнал е разделен за различни части (показани по долу на Фигура 2), които се симулират посредством представените уравнения (1), (2) и (3). Частите от сигнала, обозначени с числата 1, 3, 5 и 6 се симулират с уравнение от вида $y = A \sin(2\pi f t + \alpha)$, а частите, обозначени с числата 2, 4 и 7 се симулират с уравнение от вида $y = a t^2 + b$.



Фиг. 2. Схема на PPG реализация

РЕЗУЛТАТИ

На фигура 3 са показани различни сигнали от симуирани фотоплетизмографски серии, получени чрез програмната реализация на описания алгоритъм посредством промяна на входните параметри.

Направена е оценка на алгоритъма чрез синтезирани PPG серии с различна дължина и отчитане на времето за изпълнение на създадената програма в зависимост от зададената предварително дължина на всяка една синтезирана серия. Получените резултати от проведените изследвания са представени в таблица 1.

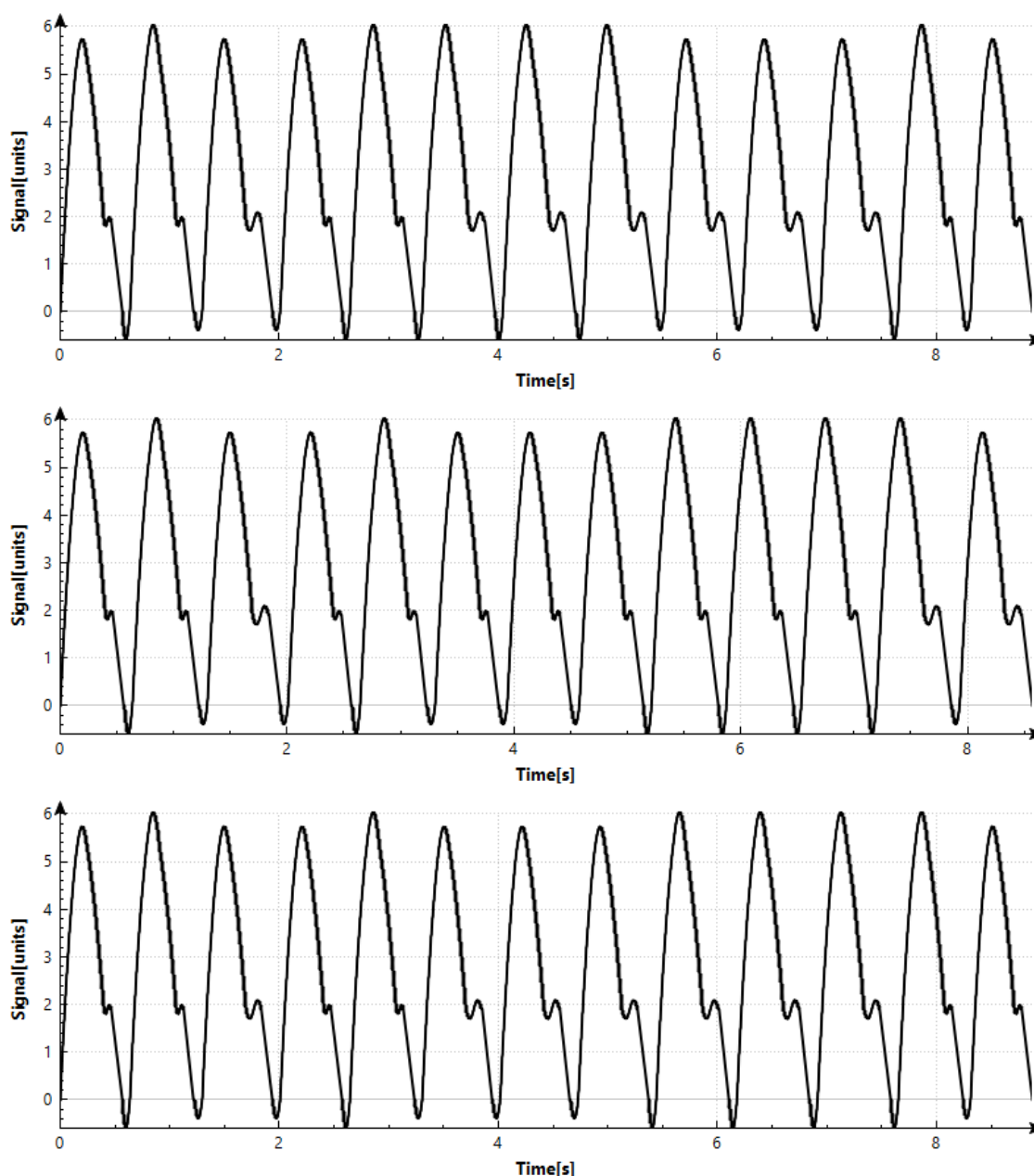
Изследванията са проведени чрез използване на персонален компютър с процесор Intel Core i5 13500. С цел избягване на краткотрайни смущения, това изследването е проведено съгласно следната методика:

1. Честота на дискретизация – 1024 Hz;
2. Брой на пулсовите вълни – съгласно таблица 1 колона „Дължина“;
3. Генерираните пулсови вълни са с еднакви параметри;
4. След промяна на дължината демонстрационната програма се стартира отново;
5. Извършват се 50 последователни пресмятания за зададената дължина.

Времето за изпълнение е средното от 50-те изпълнения и е показано в колона „Време в секунди“ (таблица 1).

Таблица. 1. Време за изпълнение

Дължина (брой пулсови вълни)	Време в секунди
1000	0.086
2000	0.172
3000	0.257
4000	0.343
5000	0.430
6000	0.514
7000	0.600
8000	0.688
9000	0.774
10000	0.890
20000	1.713
50000	4.895
100000	8.972



Фиг. 3. Симулирани PPG серии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статията представя алгоритъм за фотоплетизмографски сигнали чрез използване на традиционни математически уравнения. На базата на представения алгоритъм е създадена софтуерна програма за персонален компютър. Определени са времената за симулиране на сигнали с различна дължина.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научното изследване е проведено като част от проекта „Моделиране и създаване на сензорна система за изследване и анализ на здравословното състояние на организма“ КП-06-М67/5 от 13.12.2022г., финансиран по Конкурс за финансиране на млади учени и постдокторанти 2022г. от Фонд „Научни Изследвания“.

REFERENCES // ЛИТЕРАТУРА

1. Alvin Sahroni, Izza Alifa Hassya, Rafky Rifaldi, Nida Ul Jannah, Aditama Faqih, Irawan, Aisha Widi Rahayu. “HRV Assessment Using Finger-tip Photoplethysmography (PulseRate) as Compared to ECG on Healthy Subjects During Different Postures and Fixed Breathing Pattern”. The Fifth Information Systems International Conference 2019. Procedia Computer Science 161 (2019), pp. 535–543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.153>
2. Ghamari, M., C. Soltanpur, Sergio Cabrera, R. Romero, R. Martinek, H. Nazeran. “Design and Prototyping of a Wristband-Type Wireless Photoplethysmographic Device for Heart Rate Variability Signal Analysis”. Conference: Accepted in the 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society At: Florida, USA. 2016.
3. Georgieva-Tsaneva, G. (2022). “Preprocessing and Mathematical Analysis of PPG Signals”, Science Series “Innovative STEM Education”, volume 04, ISSN: 2683-1333, Institute of Mathematics and Informatics – Bulgarian Academy of Sciences, pp. 48-55, DOI: <https://doi.org/10.55630/STEM.2022.0407>
4. A. S. Zadi, R. M. Alex, R. Zhang, D. E. Watenpaugh and K. Behbehani, 2018, “Mathematical Modeling of Arterial Blood Pressure Using Photo-Plethysmography Signal in Breath-hold Maneuver”, 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Honolulu, HI, USA, 2018, pp. 2711-2714, DOI: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2018.8512776>
5. Lu Wang, Lisheng Xu, Shuting Feng, Max Q.-H. Meng, Kuanquan Wang. “Multi-Gaussian fitting for pulse waveform using Weighted LeastSquares and multi-criteria decision making method”. Computers in Biology and Medicine. 43, pp. 1661-1672. 2013.
6. The Qt Company, 2024, Qt - Tools for Each Stage of Software Development Lifecycle, Available at: <https://www.qt.io/> (last view: 07-10-2024)
7. Microsoft, 2024, Visual Studio: IDE and Code Editor for Software Developers and Teams, Available at: <https://visualstudio.microsoft.com/> (last view: 07-10-2024)

Received: 14-10-2024 Accepted: 25-10-2024 Published: 20-12-2024

Cite as:

Cheshmedzhiev, K., Georgieva-Tsaneva, G., Tsanev, Y.-A. (2024). “Mathematical Tools for Simulating Photoplethysmographic Signals”, Science Series “Innovative STEM Education”, volume 06, ISSN: 2683-1333, pp. 189-194, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55630/STEM.2024.0622>