

УДК:681.3.3.01+681.325

doi.org/10.15407/fmmit2024.39.125

Аналіз фотоплетизмографічних сигналів за допомогою коефіцієнтів вейвлет-перетворення та скалограми для оцінки серцево-судинних процесів

Адріан Наконечний¹, Ігор Бережний²

¹ д.т.н., професор, Національний університет „Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, e-mail: adrnakon@gmail.com

² PhD student, Національний університет „Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, C/C++ R&D (Research and Development) Software Engineer at SoftServe Inc., Lviv HQ. 2D Sadova Street Lviv 79021, e-mail: berezhnyj95@gmail.com

Дистанційна фотоплетизмографія є неінвазивним методом вимірювання змін об'єму крові, який широко застосовується для оцінки стану серцево-судинної системи. Однак, через складність сигналів RPPG та низьку якість відео потоку, аналіз цих сигналів вимагає точних і адаптивних методів обробки даних. Вейвлет-перетворення та скалограма є ефективними інструментами для виявлення часово-частотних характеристик цих сигналів. Метою дослідження є застосування коефіцієнтів вейвлет-перетворення та скалограми для детального аналізу фотоплетизмографічних сигналів з метою покращення оцінки серцево-судинних процесів. У даній роботі використано вейвлет-перетворення для отримання коефіцієнтів, що відображають багатомасштабну структуру RPPG-сигналів. Аналіз скалограми дозволяє ідентифікувати ключові частотно-часові зміни, що характеризують серцево-судинні процеси. Особлива увага приділяється виявленню характеристичних ознак пульсових коливань і оцінці їхньої взаємозалежності зі станом серцево-судинної системи. Отримані результати показують, що взаємна оцінка коефіцієнтів вейвлет-перетворення та скалограми дозволяє значно покращити точність діагностування серцево-судинних процесів, що відкриває перспективи для розробки нових методів моніторингу пацієнтів із захворюваннями серцево-судинної системи.

Ключові слова: фотоплетизмографія, скалограма, вейвлет перетворення, вейвлет коефіцієнти.

Вступ. Дистанційна фотоплетизмографія (RPPG) є одним із найбільш поширених неінвазивних методів оцінки змін об'єму крові в периферичних тканинах. Цей метод використовує світлові сигнали для визначення рівня кровонаповнення в судинах, що робить його цінним інструментом для моніторингу серцево-судинної системи. Завдяки своїй простоті у використанні, безболісності та можливості тривалого спостереження, RPPG знайшла широке застосування в різних медичних областях, зокрема в кардіології, неврології та анестезіології. Однак аналіз сигналів RPPG залишається складним завданням через їхню багатогранність і чутливість до зовнішніх впливів, таких як рухи пацієнта, зміни температури та артефакти, пов'язані з проведенням вимірювань. З метою отримання точних та надійних даних, дослідники звертаються до більш просунутих методів обробки сигналів. Одним із таких методів є вейвлет-перетворення, яке дозволяє проводити багатомасштабний аналіз сигналів,

відстежуючи як часові, так і частотні характеристики. Вейвлет-перетворення забезпечує можливість виділення ключових компонентів сигналу, які можуть бути критично важливими для розуміння фізіологічних процесів. Цей підхід має значний потенціал у виявленні закономірностей, які вказують на різні серцево-судинні стани, такі як аритмії, ішемія та інші аномалії. З іншого боку, аналіз скалограми, що є візуалізацією вейвлет-коефіцієнтів, дозволяє більш детально вивчати динаміку змін сигналів RPPG в часі та частоті. Це відкриває нові можливості для діагностики та моніторингу серцево-судинних захворювань, що є актуальним у сучасній медицині. У зв'язку з цим, дослідження, спрямоване на інтеграцію вейвлет-перетворення та аналізу скалограми у вивченні фотоплетизмографічних сигналів, є особливо важливим. Мета цього дослідження полягає в застосуванні цих методів для покращення оцінки серцево-судинних процесів та підвищення точності діагностики.

1. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останні дослідження в галузі обробки біосигналів демонструють, що вейвлет-перетворення є ефективним методом для аналізу нелінійних і складних сигналів, таких як RPPG. Наприклад, роботи [1-4] показують, що застосування вейвлет-перетворення дозволяє виділити важливі частотні компоненти RPPG, пов'язані з пульсовою активністю та іншими фізіологічними процесами. Водночас дослідження [2-4] підкреслюють важливість аналізу скалограми для виявлення багаторівневих змін у RPPG-сигналах, що дозволяє отримати більш детальне уявлення про функціонування серцево-судинної системи (ССС). Однак, у сучасній науковій літературі все ще бракує системних досліджень, що поєднують використання коефіцієнтів вейвлет-перетворення та скалограми для аналізу RPPG-сигналів на наявність захворювань або відхилень роботи серцево-судинної системи людини.

2. Виклад основного матеріалу дослідження

2.1. Мета дослідження. Метою даного дослідження є застосування коефіцієнтів вейвлет-перетворення та аналізу скалограми у часо-частотному просторі для покращення оцінки серцево-судинних процесів на основі фотоплетизмографічних сигналів. Дослідження фокусується на виявленні ключових часово-частотних компонентів RPPG-сигналів, що можуть бути корисними для діагностики стану серцево-судинної системи.

2.2. Методи збору та попередньої обробки фотоплетизмографічних сигналів. Дослідження проведено на даних з наборів UBFC-rPPG [3], PURE [4], SCAMPS [5], UBFC-Phys [6], а також внутрішніх записах за допомогою мобільного телефону Google Pixel 4. Досліджені дані містять понад 120 відео, на яких присутні 62 суб'єкти. Дані відео містять різні характеристики камер, освітлення, приміщення, роздільну здатність та кількість кадрів за секунду. Загалом аналізовано відео з роздільною здатністю Standard Definition (SD), High Definition (HD), and Full High Definition (FullHD). Відеозаписи мають різну кількість кадрів на секунду, а саме: 10fps, 15fps, 20fps, 30fps та 60fps.

3. Методологія вейвлет-перетворення для аналізу RPPG-сигналів.

Фотоплетизмограма (PPG або «плетизмограма») використовується в пульсоксиметрії та має вигляд повільного пульсуючого сигналу, що вказує на зміну поглинання світла на судинній ділянці (наприклад, палець, палець ноги, мочка вуха, лоб, щоки, обличчя), що відповідає локалізованому збільшенню об'єму крові з кожним серцевим ударом. Останніми роками все частіше визнається, що він є носієм величезної кількості фізіологічної інформації, включаючи частоту серцевих скорочень і сатурацію кисню (основна функція пульсоксиметрії), а також характеристик, які корелюють з частотою дихання (ЧД), дихальним зусиллям, артеріальним тиском, гіповолемією, збудженням, віковою жорсткістю артерій і т.д.

Вейвлет-розкладання та отримання коефіцієнтів є важливим етапом у часово-частотному аналізі сигналу [1], що дозволяє розкласти його на компоненти різних масштабів. Даний процес передбачає декомпозицію сигналу [2], де кожен рівень розкладу відображає певний частотний діапазон і дозволяє дослідити окремі часово-частотні характеристики. Отримані коефіцієнти вейвлет-перетворення містять інформацію про енергетичний розподіл сигналу, що дозволяє ідентифікувати ключові зміни в амплітуді та частоті. Вейвлет-реконструкція (Рисунок 1), є процесом відновлення вихідного сигналу з отриманих коефіцієнтів. Вона забезпечує відновлення сигналу з урахуванням втрачених деталей та артефактів, зберігаючи його основні характеристики. Це особливо корисно для дослідження динамічних змін фізіологічних процесів, таких як серцевий ритм, які мають специфічну структуру.

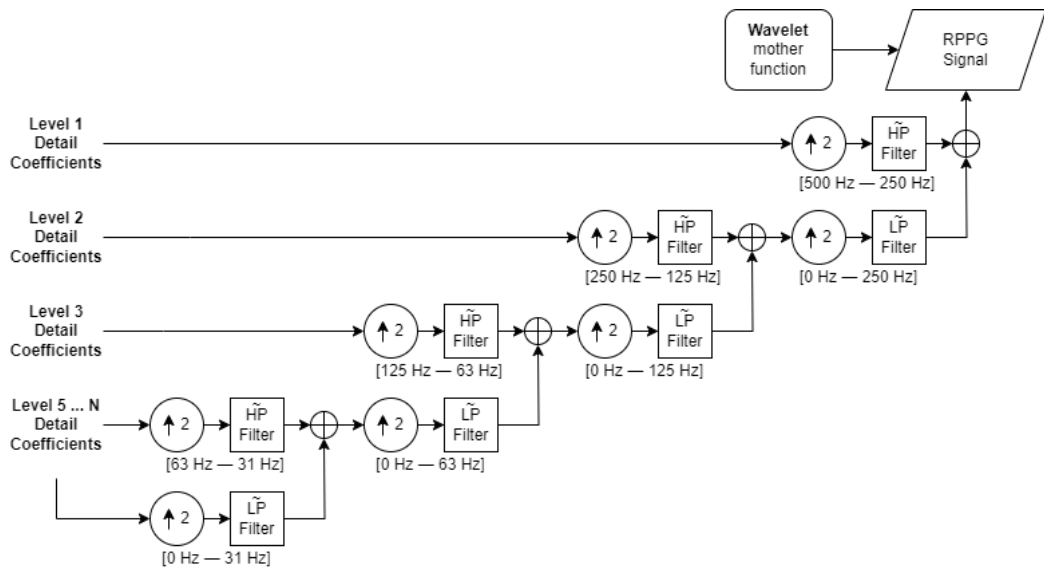


Рис. 1. Метод вейвлет реконструкції з метою отримання вейвлет коефіцієнтів RPPG сигналу

Таким чином, вейвлет-розкладання сигналу, порогування отриманих коефіцієнтів та реконструкція дозволяють не лише розкласти сигнал на складові [7], але й відновити його для подальшого аналізу, що робить їх цінними для точної оцінки

серцево-судинних процесів. Після вейвлет реконструкції сигналу RPPG отримані коефіцієнти представляються у вигляді часових залежностей (Рисунок 2), де наведені вихідні коефіцієнти 5 рівнів вейвлет-розкладу та реконструкції сигналу RPPG. Варто зазначити, що кожний коефіцієнт відображає певну часо-частотну інформаційну частину сигналу RPPG. Дослідження проведено для різних даних RPPG, що показало доцільність розкладу не вище 6 рівня.

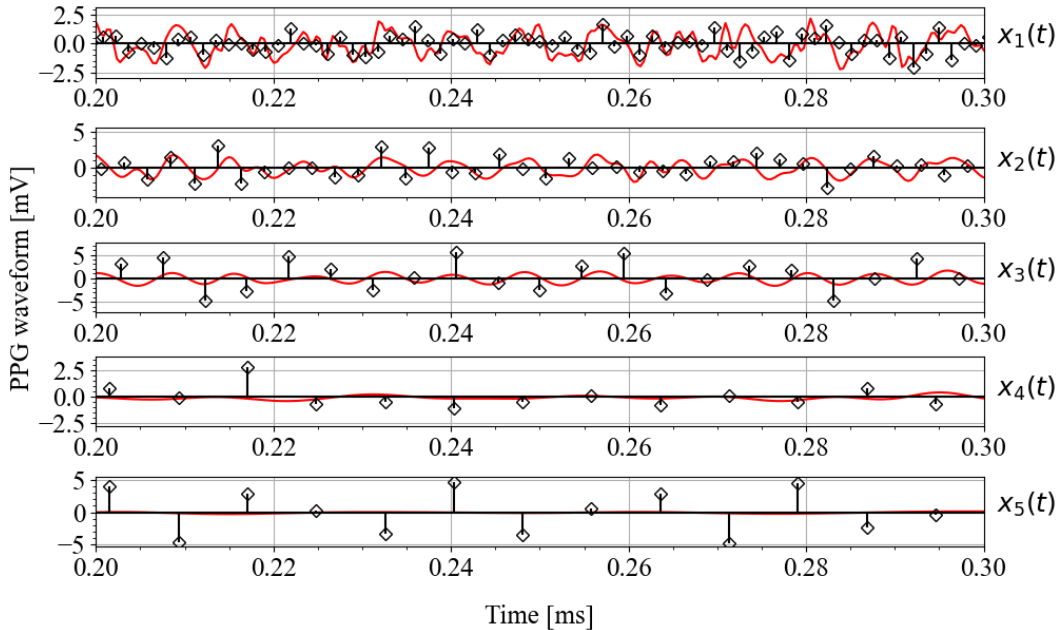


Рис. 2. Коефіцієнти вейвлет розкладу та реконструкції сигналу RPPG використовуючи d_{mey} материнську вейвлет функцію

4. Побудова та аналіз скалограми для RPPG-сигналів

Відомо, що скалограма представляє графічне подання енергії вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах, де кожен масштаб відповідає певному частотному діапазону. Завдяки такій візуалізації представляється можливість виявлення ключових інформативних характеристик сигналу, наприклад, його періодичність, частотні коливання та короточасні зміни, які часто вказують на фізіологічні процеси або можливі аномалії у роботі серцево-судинної системи людини. Побудова та аналіз скалограми для RPPG-сигналів передбачають візуалізацію розподілу енергії вейвлет-коефіцієнтів у часово-частотній площині. На Рисунку 3 зображено скалограму сигналу RPPG-сигналу без фільтрування, де основна інформаційна частота складає 40-60Hz. Після проведення вейвлет фільтрування [1-2] можна зауважити (Рисунок 4), що завади які були присутні на відео відфільтровані і вихідний сигнал містить основну складову RPPG-сигналу.

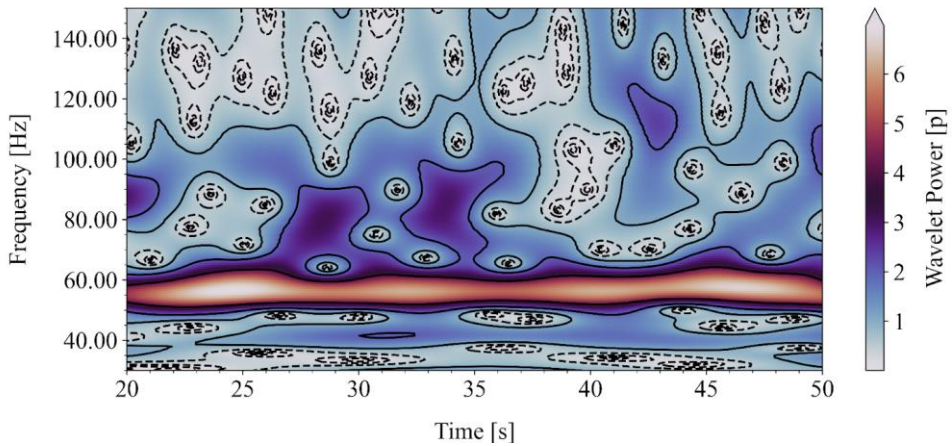


Рис. 3. Вейвлет-скалограма сигналу дистанційної фотоплетизмограми без фільтрування

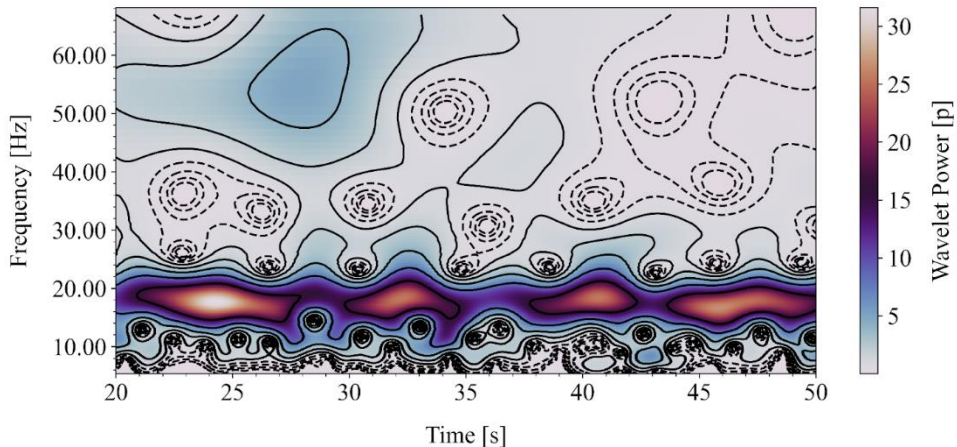


Рис. 4. Вейвлет-скалограма сигналу дистанційної фотоплетизмограми з вейвлет-фільтруванням

Такий підхід дозволяє візуально оцінити розподіл енергії сигналу на кожному часово-частотному рівні. Часові зміни на скалограмі можуть відображати миттєві зміни у серцевій діяльності, наприклад аритмії або інші нерегулярності в ритмі серця. Частотні компоненти, які відповідають наявним в RPPG-сигналі коливанням, дозволяють визначити серцевий ритм та його варіабельність.

5. Інтерпретація значущих вейвлет-коефіцієнтів

Візуалізація коефіцієнтів у вигляді скалограми дозволяє отримати наочне уявлення про розподіл енергії у різних масштабах, що спрощує інтерпретацію результатів і дозволяє швидко помітити аномалії чи зміну динаміки серцево-судинних процесів [8, 10]. Також в роботі проведено дослідження вейвлет-коефіцієнтів після розкладу RPPG-сигналу на наявність інформативної складової для визначення варіабельності та частоти дихання. Вейвлет-коефіцієнти 6 рівнів представлені на

Рисунку 5. На основі отриманих даних скалограми можна стверджувати, що основна інформація про серцево-судинну систему відображена між 3 і 6 рівнями розкладу вейвлет-коефіцієнтів. Рівень 1 та рівень 2 містять велику кількість шуму, що унеможливує отримання корисної інформації про ССС людини.

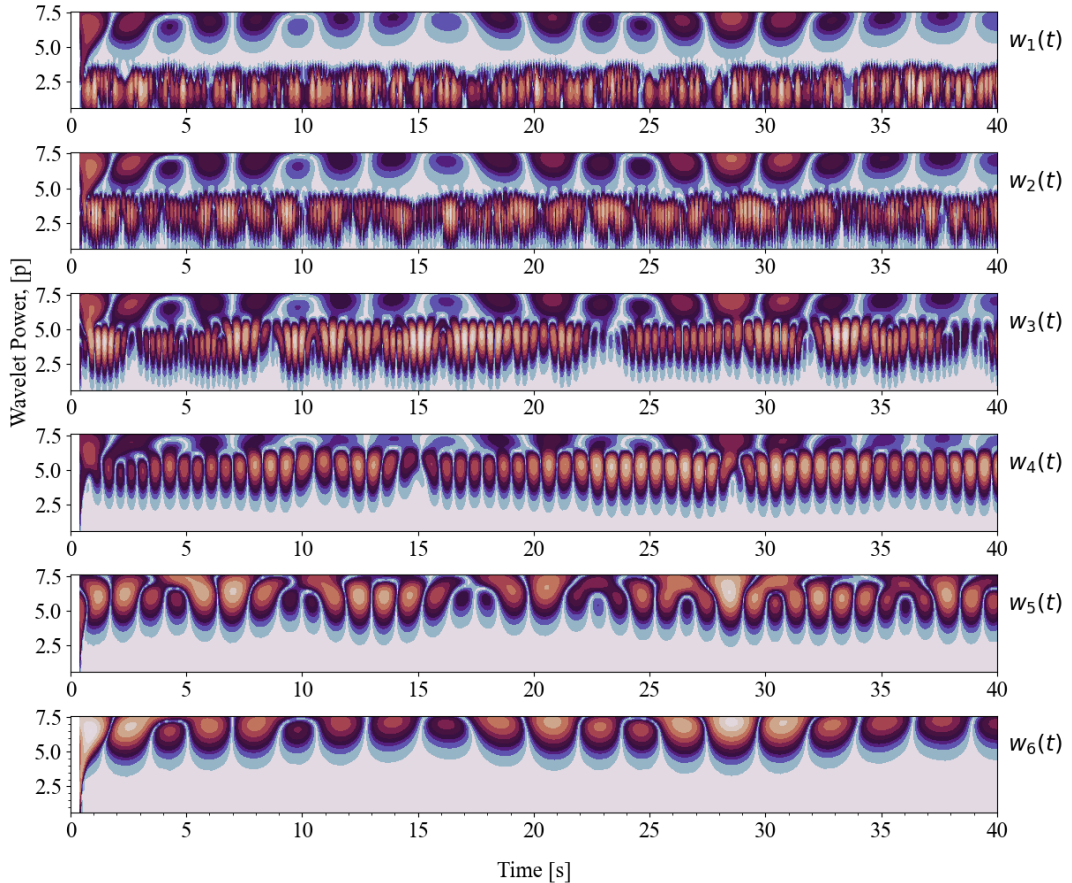


Рис. 5. Коефіцієнти вейвлет розкладу сигналу RPPG використовуючи dmeu материнську вейвлет функцію

Проведено порівняльний аналіз даних дата сетів для кожного вейвлет-коефіцієнта до даних, які відображають варіабельність серцевого ритму, отриманого завдяки пульсоксиметру, та дихальних хвиль, які отримані медичним приладом Respiratory Belt, що часто використовують як в медицині, так і в спорті. Можлива наявність передчасних шлуночкових скорочень (ПШС), які представляють спостережувані ектопічні скорочення і мають широкі комплекси, що виникають раніше, ніж очікувалося, з огляду на нормальний інтервал R-R (варіабельність). Їх наявність, особливо якщо вони виникають часто, може вказувати на підвищену захворюваність та/або смертність у певних групах пацієнтів.

5.1. Варіабельність серцевого ритму. Розглянутий і проаналізований алгоритм ідентифікації R-R інтервалу [2,7,11] та порівняння отриманих даних з вейвлет

коефіцієнтами показав наявність відповідності між 4 та 5 рівнями коефіцієнтів. На рисунку 6 спостерігається наявність затримки в сигналах RPPG та медичного приладу (GT), що пов'язано зі швидкістю циркуляції крові. Пульсоксиметр значно швидше може зафіксувати серцевий удар оскільки є контактним приладом, а сигнал RPPG, отриманий з обличчя пацієнта неінвазивним методом, створює затримку. Важливим є відношення скалограми до R-R піків знайдених на сигналі RPPG.

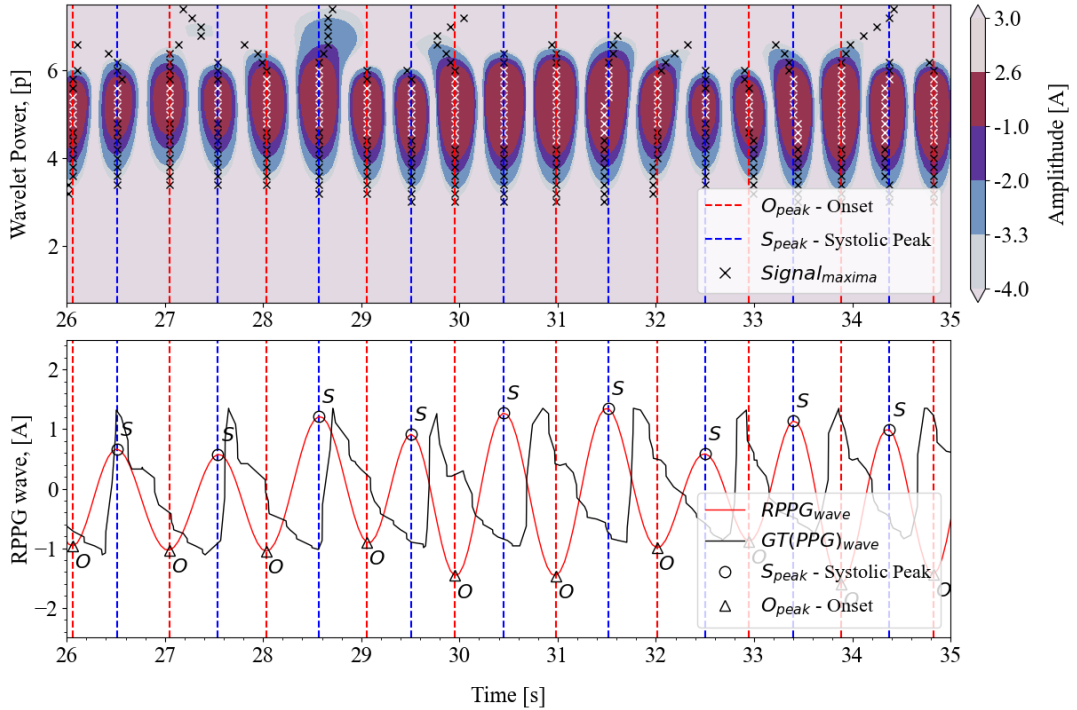


Рис. 6. Порівняння вейвлет-скалограми коефіцієнта 4 рівня з сигналом RPPG та медичним приладом

Дослідження також показує що даним методом можна ідентифікувати та аналізувати систолічне та діастолічне значення сигналу плетизмограми. На 3 та 4 рівні присутня інформація про дикротичну складову серцевого ритму.

5.2. Дихальні модуляції, частота дихання і дихальні зусилля. Частота дихання (ЧД), є клінічно важливим параметром, оскільки вона надає інформацію, яка стосується багатьох аспектів дихального статусу пацієнта. Однак, найпоширенішим методом моніторингу ЧД на практиці є переривчасте ручне спостереження. Це, мабуть, один з найважливіших життєво важливих показників, який досі вимірюється переважно вручну. Крім вимірювання ЧД за допомогою стандартного пульсоксиметра, використовуються методи, засновані на вейвлет-перетворенні [11]. В них проводиться оцінка після того, як буде виявлена циклічність фаз на фазовій діаграмі вейвлет-перетворення, що відповідає диханню (Рисунок 5).

Результат дослідження (Рисунок 7) вказує що коефіцієнт 6 рівня відповідає інформації про частоту дихання. Отриманий сигнал порівнювався з сигналом медичного приладу Respiratory Belt, та враховується зсув по фазі за рахунок

дистанційного моніторингу. Середня похибка частоти дихальних хвиль складає 3-12% залежно від якості відео та наявності руху в кадрі.

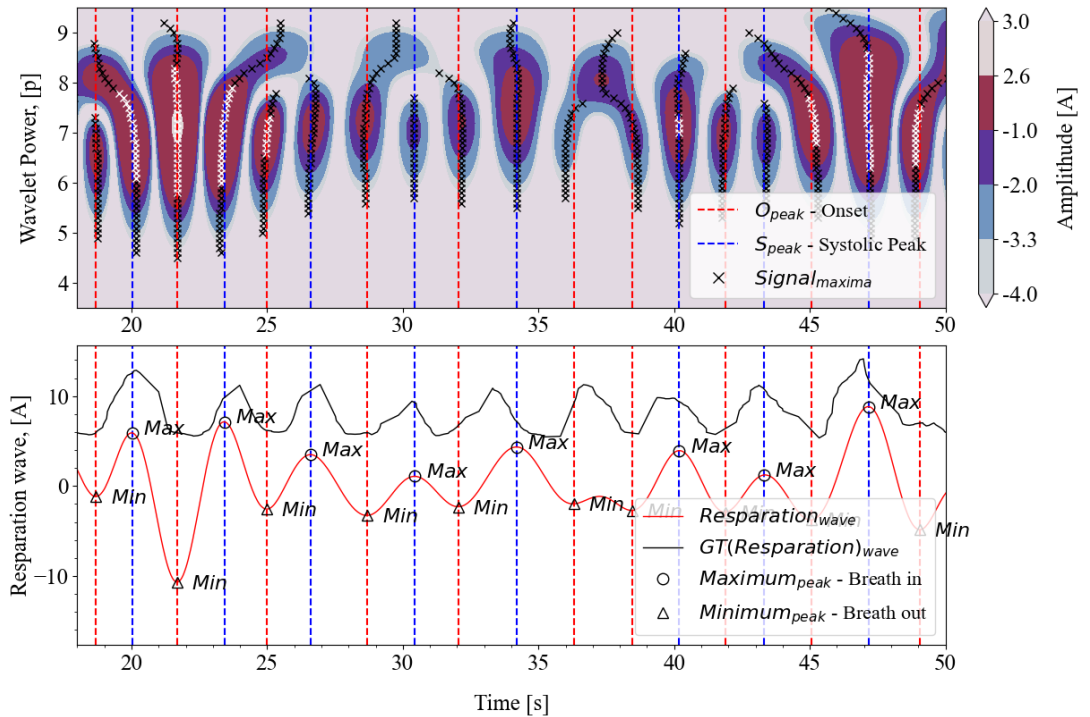


Рис. 7. Вейвлет-скалограма сигналу дистанційної фотоплетизмограми з вейвлет-фільтруванням

Загальна інформація по сигналу RPPG та залежність від вибору материнської вейвлет функції наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1

Результати методу вейвлет декомпозиції

Wavelet mother function	Mean NNI (s)	Minimum NNI (s)	Maximum NNI (s)	Mean Delta-NNI (ms)	SD (bpm)	SDSD (ms)	RMSSD (ms)
haar	0.963	0.715	1.431	0.894	12.044	0.183	0.283
dmey	0.974	0.671	1.609	0.939	12.881	0.204	0.289
sym5	1.154	0.671	23.941	0.939	13.232	2.063	2.065
db18	0.978	0.671	1.744	0.939	11.548	0.189	0.283
db8	0.958	0.671	1.654	0.939	11.505	0.197	0.297
bior2.2	0.977	0.715	2.146	0.894	12.423	0.22	0.327
rbio3.1	0.893	0.671	1.386	0.894	13.447	0.188	0.266

Висновки. Використання вейвлет-розкладу та вейвлет-скалограми для аналізу RPPG-сигналів забезпечує ефективний метод декомпозиції RPPG сигналу на частотні складові, що дає змогу виділити ключові параметри, такі як частота серцевих скорочень, частота дихання та інші показники, важливі для оцінки серцево-судинної системи людини.

Наведено метод вейвлет-реконструкції, що дозволяє зберігати основні характеристики сигналу після обробки, а також дозволяє точніше досліджувати динаміку фізіологічних процесів без завад та шумів спричинених рухом у кадрі. Візуалізація у вигляді скалограми дозволила відстежувати енергетичний розподіл на різних часово-частотних рівнях, що сприяє ідентифікації періодичних і миттєвих змін у сигналі, вказуючи на можливі аномалії.

Рівні вейвлет-коефіцієнтів, зокрема від 3 до 5, містять інформацію для визначення варіабельності серцевого ритму. Шостий рівень відображає дихальні хвилі, тоді як нижчі рівні містять надмірний шум що унеможливує їх аналіз.

Загалом, використаний вейвлет-аналіз та побудова скалограми для RPPG-сигналів показали свою високу ефективність для моніторингу стану серцево-судинної системи. Подальші дослідження можуть бути направлені на збільшення точності та дослідження вмісту кисню в крові за допомогою вейвлет коефіцієнтів.

Література

- [1] Nakonechnyi A., Bereznyi I., (2023) "Estimation of heart rate and its variability based on wavelet analysis of photoplethysmographic signals in real time", *Intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications: proceedings of the 12th IEEE International conference IDAACS*, Dortmund, Germany, 7–9 September 2023. Vol. 1. – 2023. – C. 765–770. ISSN: 27704262, ISBN: 979-835035805-6, DOI: 10.1109/IDAACS58523.2023.10348785
- [2] Bereznyi I., Nakonechnyi A., (2024). "Analysis of methods and algorithms for remote photoplethysmography signal diagnostic and filtering", *Advances in Cyber-physical Systems 2024*, Volume 9, Number 1, pp. 82-88, ISSN: 2524-0382, DOI: 10.23939/acps2024.01.082G. Bradski. The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000.
- [3] Wang, Xin, Tapani Ahonen, and Jari Nurmi. "Applying CDMA technique to network-on-chip." *IEEE transactions on very large scale integration (VLSI) systems* 15.10 (2007): 1091–1100.
- [4] Arslanova, I., Galvez-Pol, A., Kilner, J. et al. Seeing Through Each Other's Hearts: Inferring Others' Heart Rate as a Function of Own Heart Rate Perception and Perceived Social Intelligence. *Affec Sci* 3, pp. 862–877 (2022) doi:10.1007/s42761-022-00151-4
- [5] L. Wang, H. Li, H. Qiu, Q. Wu, F. Meng and K. N. Ngan, "POS-Trends Dynamic-Aware Model for Video Caption," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 32, no. 7, pp. 4751–4764, July 2022, doi: 10.1109/TCSVT.2021.3131721
- [6] A. Gudi, M. Bittner, R. Lochmans and J. van Gemert, "Efficient Real-Time Camera Based Estimation of Heart Rate and Its Variability," 2019 *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW)*, Seoul, Korea (South), 2019, pp. 1570–1579, doi: 10.1109/ICCVW.2019.00196.
- [7] Wang W, den Brinker AC, Stuijk S, de Haan G. Algorithmic Principles of Remote PPG. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2017 Jul;64(7), pp. 1479–1491. doi: 10.1109/TBME.2016.2609282
- [8] Serge Bobbia, Richard Macwan, Yannick Benezeth, Alamin Mansouri, and Julien Dubois. Unsupervised skin tissue segmentation for remote photoplethysmography. *Pattern Recognition Letters*, 124, pp. 82–90, 2019.
- [9] Ronny Stricker, Steffen Müller, and Horst-Michael Gross. Non-contact video-based pulse rate measurement on a mobile service robot. In *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 1056–1062. IEEE, 2014.
- [10] Daniel McDuff, Miah Wander, Xin Liu, Brian L Hill, Javier Hernandez, Jonathan Lester, and Tadas Baltrusaitis. Scamps: Synthetics for camera measurement of physiological signals. *arXiv preprint arXiv:2206.04197*, 2022.

Адріан Наконечний, Ігор Бережний

Аналіз фотоплетизмографічних сигналів за допомогою коефіцієнтів вейвлет-перетворення та скалограми для оцінки серцево-судинних процесів

- [11] Rita Meziati Sabour, Yannick Benezeth, Pierre De Oliveira, Julien Chappe, and Fan Yang. Ubcphys: A multimodal database for psychophysiological studies of social stress. IEEE Transactions on Affective Computing, 2021.

Analysis of photoplethysmographic signals using wavelet transform coefficients and scalogram for assessment of cardiovascular processes

Adrian Nakonechnyi, Ihor Berezhnyi

Remote photoplethysmography is a non-invasive method of measuring changes in blood volume, which is widely used to assess the state of the cardiovascular system. However, due to the complexity of RPPG signals and the low quality of the video stream, the analysis of these signals requires accurate and adaptive data processing methods. Wavelet transform and scalogram are effective tools for detecting the time-frequency characteristics of these signals. The aim of the study is to apply the wavelet transform coefficients and scalogram for detailed analysis of photoplethysmographic signals in order to improve the assessment of cardiovascular processes. In this work, wavelet transforms were used to obtain coefficients that reflect the multiscale structure of RPPG signals. The analysis of the scalogram allows us to identify key frequency and time changes that characterize cardiovascular processes. Particular attention is paid to identifying the characteristic features of pulse oscillations and assessing their interdependence with the state of the cardiovascular system. The obtained results show that the mutual evaluation of the coefficients of the wavelet transform and the scalogram can significantly improve the accuracy of diagnosing cardiovascular processes, which opens up prospects for the development of new methods for monitoring patients with cardiovascular diseases.

Отримано 05.11.2024