

УДК 615.84

## ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНИХ ДАНИХ

*Майстренко В.М., Дегтярьов П.Є., Терещенко Т.А., Національний технічний  
університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

*Показано можливість застосування вейвлет-перетворення для фільтрації електрокардіографічних даних, що дозволяє зробити не тільки відсічення сторонніх шумів, відновлення ізолінії та виділення інтервалів R-R, але і враховувати локалізацію особливостей електрокардіосигналу при його фільтрації*

### **Вступ**

Сигнал електрокардіограми (ЕКГ) має складні частотно-часові характеристики і, крім електричної активності серця, містить шумову та фонову добавки, що дуже ускладнює аналіз ЕКГ та встановлення вірного діагнозу як лікарем, так і за допомогою комп'ютера [1].

Велике значення для обробки електрокардіосигналу (ЕКС) знаходить застосування вейвлет-перетворення. Воно має значні переваги в порівнянні з перетворенням Фур'є, особливо в умовах зміни параметрів процесу за часом, оскільки Фур'є аналіз дає тільки усереднені коефіцієнти для всього досліджуваного часового ряду. У цьому випадку складний сигнал аналізується шляхом розкладання по базисних функціях, отриманих з деякого прототипу шляхом стиснень, розтягнень і зсуву. Функція-прототип має назву материнського, або аналізуючого вейвлета. У підсумку вейвлет-перетворення забезпечує двомірне розгорнення досліджуваного сигналу, при цьому частота і час розглядаються як незалежні змінні [2 - 4].

Розкладання сигналу на окремі складові при вейвлет-перетворенні можна ефективно застосовувати при придушенні спотворень ЕКС). Ця процедура має назву вейвлет-фільтрації, а програма, що виконує такі дії, вейвлет-фільтром. Варіюючи межами області масштабів, можна настроїти вейвлет-фільтр для рішення різних проблем. У випадку даних ЕКГ це дозволяє вирішити як мінімум, три задачі: відсічення сторонніх шумів, відновлення ізолінії, виділення інтервалів R-R [2, 5, 6].

### **1 Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Вейвлет-аналіз – це сучасний та перспективний метод обробки даних. Апарат вейвлет-аналізу отримав свій розвиток на початку 1980-х років у працях Морле, Гросмана тощо. Результати, отримані у самих різних галузях за допомогою вейвлет-аналізу, підсилили зацікавленість до цього напрямку та сприяють його безперервно триваючому розвитку [2 - 4].

Методи вейвлет-аналізу можливо застосувати до даних різної природи. Це можуть бути, наприклад, одномірні функції або двомірні зображення. Грубу класифікацію вейвлет-алгоритму можна зробити, виділивши неперервне (CWT

– Continuous Wavelet Transform) та дискретне (DWT – Discrete Wavelet Transform) вейвлет-перетворення. Отримати набір вейвлет-коефіцієнтів у випадку дискретного перетворення швидше, і воно дає достатньо точне представлення про сигнал при меншому об'ємі отриманих у результаті даних. Безперервне перетворення потребує більших обчислювальних витрат, але, разом з цим, дозволяє детальніше роздивитися структуру сигналу.

Вибір того чи іншого методу залежить від отриманого завдання та типу отриманих даних, які необхідно обробити, від можливостей обчислювальної техніки та від того, у якому вигляді необхідно представити результат.

### 1.1 Вейвлет-перетворення

Термін вейвлет-перетворення об'єднує два види перетворення – пряме і обернене, які, відповідно, перетворюють досліджуєму функцію  $f(x)$  у набір вейвлет-коефіцієнтів  $W_\psi(a, b)f$  і навпаки [2, 3].

Пряме вейвлет-перетворення здійснюється згідно правилу

$$W_\psi(a, b)f = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \int \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  – параметри, визначаючи відповідно масштаб і зміщення функції  $\psi$ , названої аналізуючим вейвлетом,  $C_\psi$  – нормуючий множник.

Інтегрування здійснюють по всій числовій осі.

Базисний, або материнській вейвлет  $\psi$ , утворює за допомогою розтягнень і зсувів сімейство  $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ .

Володючи відомим набором коефіцієнтів  $W_\psi(a, b)f$ , можна відтворити початковий вигляд функції  $f(x)$ :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \iint \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) [W_\psi(a, b)f] \frac{da db}{a^2}. \quad (2)$$

Пряме (1) і обернене (2) перетворення залежать від деякої функції  $\psi(x) \in L^2(\mathbf{R})$ , яку називають базисним вейвлетом. Практично єдиним обмеженням на його вибір є умова кінченності нормуючого множника

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\tilde{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega = 2 \int_0^{\infty} \frac{|\tilde{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty, \quad (3)$$

де  $\tilde{\psi}(\omega)$  – Фур'є-образ вейвлета  $\psi(x)$ :  $\tilde{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) e^{-i\omega x} dx$ .

Цій умові задовольняє багато функцій, тому можливо підібрати вигляд вейвлета, найбільш підходящого для рішення конкретної задачі.

Умова (3) неминуче означає, що Фур'є-образ вейвлета дорівнює нулю при нульовій частоті, тобто  $\tilde{\psi}(\omega)_{\omega=0} = 0$ . Якщо це не так, то знаменник дробу в інтегралі (3) обертається в нуль, у той час як чисельник має відмінні від нуля значення, і коефіцієнт  $C_\psi$  перестає бути скінченим.

Вейвлет-перетворення одномірного сигналу перетворює функцію однієї змінної у набір вейвлет-коефіцієнтів, яка є функцією двох змінних – масштабу і зміщення. Якщо при обчисленні перетворення ці параметри змінюються в достатніх границях, коефіцієнти  $W_{\psi}(a, b)$  мають у собі повну інформацію про вихідний сигнал.

## 1.2 Запис електрокардіограми

Запис електричної активності серця – один з найбільш відомих і широко застосованих методів дослідження діяльності серця. Звичайно роблять реєстрацію проєкції електричного імпульсу серця в декількох площинах. Чи, інакше, у декількох відведеннях. Докладну інформацію про відведення і методи аналізу ЕКГ і її реєстрації можна знайти, наприклад, у [1].

Як приклад на рис. 1 показано чотири періоди реальної ЕКГ в II відведенні, на якій можна виділити кілька характерних імпульсів, названих зубцями.

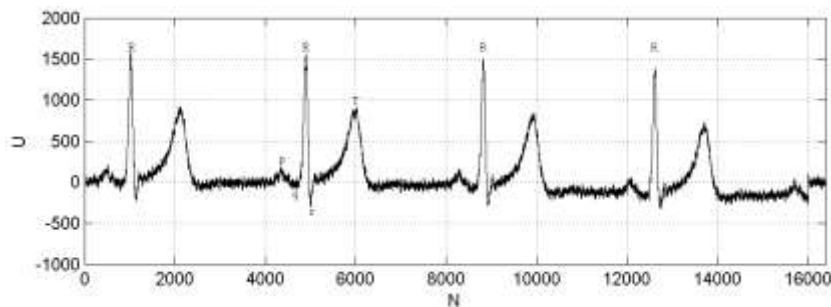


Рисунок 1 – Періоди електрокардіограми (II відведення), записаної при частоті дискретизації 500 Гц. По горизонтальній вісі відкладені номери відліків, по вертикальній – рівень сигналу у мкВ

Зубець **p** відповідає скороченню лівого і правого передсердь.

Комплекс QRS, що включає в себе три імпульси **q**, **R** і **s**, відбиває період активності шлуночків. Відзначимо, що зубці **q** і **s** можуть бути виражені слабо або зовсім зникнути.

Зубець **T** відповідає періоду реполяризації шлуночків.

Одна з основних характеристик ЕКГ – інтервал R-R між двома імпульсами **R**, що йдуть один за одним та відбивають частоту серцевих скорочень. Виявлення імпульсів **R** чи комплексів QRS є першочерговою задачею при автоматичній обробці ЕКГ. Сигнал ЕКГ крім запису електричної активності серця має шумову добавку, що містить у собі фон змінного струму (50 чи 60 Гц) мережі живлення, високочастотні коливання, викликані м'язовими скороченнями, а також низькочастотну (долі Гц) складову, обумовлену зміною опору контактів датчик-тіло.

## 1.3 Обробка даних ЕКГ

На рис. 2 показано як виглядає вейвлет-спектр та вейвлет-скелет (за допомогою “гаусового вейвлету”) сигналу ЕКГ [2, 4, 5].

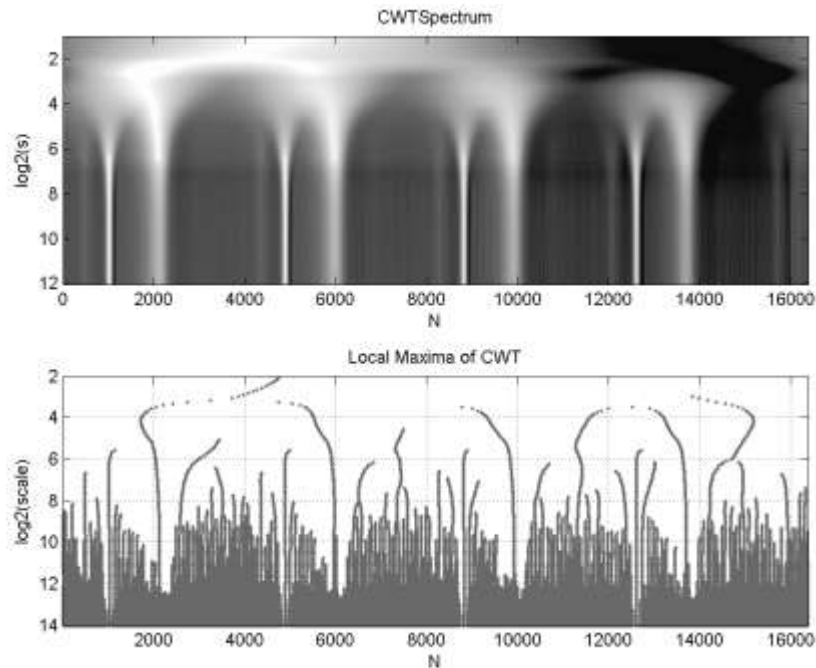


Рисунок 2 – Вейвлет-спектр та вейвлет-скелет ЕКС, представлена на рис. 1.

Горизонтальна вісь величини зсуву вейвлету збігається з віссю на рис. 1, а по вертикальній вісі в логарифмічному масштабі відкладені масштаби а Скелет наочно відбиває структуру аналізованого сигналу. Аналогічно перетворенню Фур'є, спектр показує розподіл компонентів сигналу по частоті. Однак, вейвлет-аналіз дозволяє оцінити також локалізацію тих чи інших складових. Наприклад, у нижній частині рис. 2 видні близько розташовані лінії, що утворилися через наявність високочастотних шумів у записі ЕКГ. Верхня частина, навпроти, містить тільки лінії, викликані внеском компонентів з найменшими частотами, зокрема, потенційно можливо виявити положення комплексів QRS масштаби 4-8.

## 2 Фільтрація електрокардіосигналу

Терміном фільтрація ми позначимо дещо більше, ніж просте подавлення різного роду перешкод. Вейвлет-фільтри настільки багатofункціональні, що дозволяють, маніпулюючи своїми налаштуваннями, не тільки боротися з шумами, але також витягати ті компоненти корисного сигналу, котрі не завжди можуть бути безпосередньо виявлені [2, 5].

Робота вейвлет-фільтрів зводиться до наступного. На першому етапі по вихідному сигналу будують набір коефіцієнтів (1), тобто вейвлет-спектр. Отримані коефіцієнти вейвлет-перетворення відбивають вклад різномасштабних складових сигналу, відповідно, чим вони більше, тим більше і сам коефіцієнт. Параметри зсуву та розтягнення аналізуючого вейвлету можуть варіюватися у широкому діапазоні в залежності від поставленої мети. По спектру можна визначити, у тому числі й візуально, розподіл складових за масштабами. Далі потрібно обрати один з варіантів добору вейвлет-коефіцієнтів. В обох випадках

потрібно виконати обернене перетворення (2), враховуючи при цьому, які коефіцієнти отриманого добору потрібно застосувати.

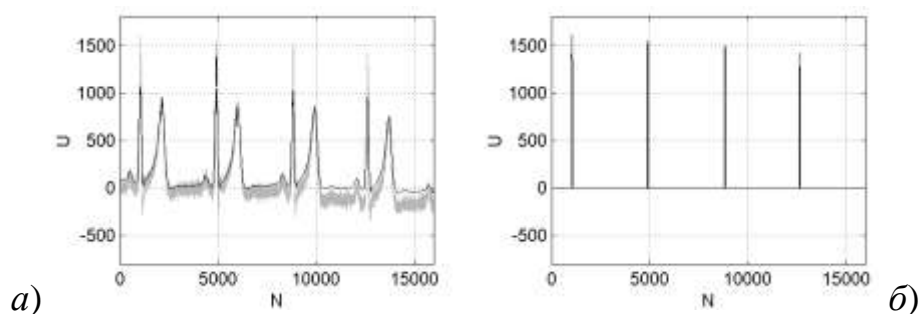
Варіюючи границями області масштабів, можна настроїти вейвлет-фільтр для рішення різних проблем. У випадку даних ЕКГ це дозволяє вирішити, як мінімум, три задачі.

**Відсікання сторонніх шумів.** Для цього необхідно зробити фільтрацію та усікання на масштабах вище деякого рівня, що звичайно легко виявити на спектрі. Области скелета, що відповідають шумам, насичені короткими скривленими лініями. Рівень відсікання легко підбирається експериментально.

На рис. 3 а показано результат дискретного вейвлет-перетворення ЕКС за допомогою вейвлета Добеши.

**Відновлення ізолінії.** Ця операція, може бути виконана також за допомогою дискретного вейвлет-перетворення з вейвлетом Добеши. Тоді сигнал втрачає сталу та лінійну складову. Її можна виконувати одночасно з фільтрацією сигналу. На рис. 3 а видно, що при обробці ЕКГ вейвлет-аналіз дозволяє позбутися спотворень ізолінії, що виникають через поганий електричний контакт між датчиком та шкірою тіла.

**Виділення інтервалів R-R.** Підбором області масштабів перетворення можна домогтися того, що комплекс QRS буде чітко виділений на фоні значно ослаблених інших компонентів сигналу ЕКГ. З рис. 3 б видно, що положення зубців R відповідають максимумам сигналу після перетворення.



а) фільтрація, відновлення ізолінії; б) виділення інтервалів R-R

Рисунок 3 – Фільтрація електрокардіосигналу представленого на рис. 1

### 3 Адаптивна фільтрація ЕКГ

Вейвлет-аналіз дозволяє також враховувати локалізацію особливостей сигналу [2, 6].

Повертаючись до рис. 3 а, можна помітити, що при виділенні шумів на вихід проникає і частина корисного сигналу. Відповідно, при фільтрації сигналу зникне не тільки шум, але і високочастотна складова комплексу QRS.

На рис. 4 один період ЕКГ розділений на кілька ділянок відповідно до характеру і рівня сигналу. Центральна область виділяє зубець R, середня – весь комплекс QRS, і, нарешті, більш широка область охоплює сигнал цілком.

У кожній з областей такої розбивки був обраний свій коефіцієнт відсічення (див. табл.1). Це дозволило зберегти високочастотну частину комплексу QRS,

де відношення сигнал/шум значно перевищує це значення в інших областях сигналу, що дало можливість знизити поріг у цьому інтервалі без збільшення шуму на виході фільтра.

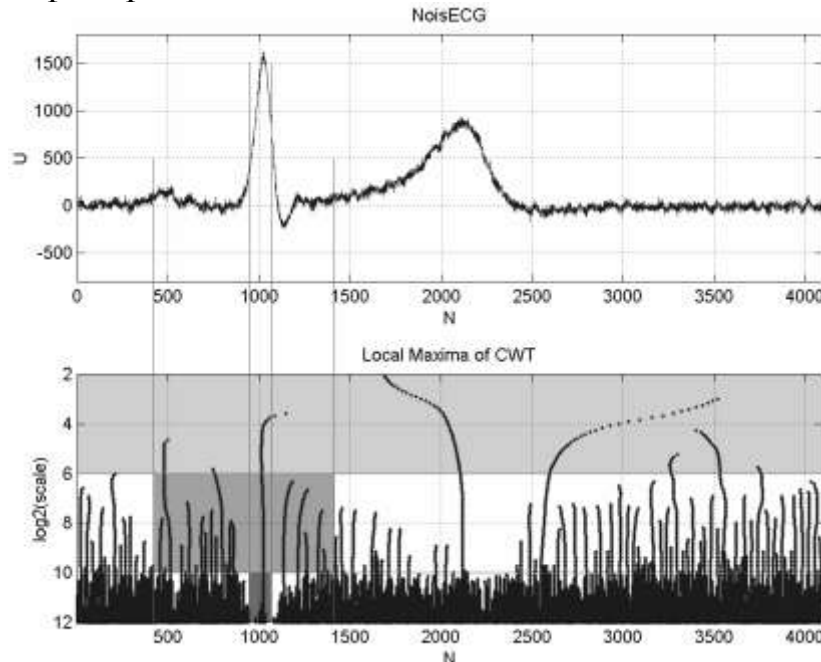


Рисунок 4 – Виділення характерних областей сигналу (зверху) і областей масштабів з різними рівнями відсікання

Таблиця 1

Масштаб $\log_2(a)$	Поріг	Інтервал N
12...10	100	950...1050
9...6	400	400...1400
< 5	250	0...4000

На рис. 5, *а* показаний фрагмент відновленого сигналу, фільтрація якого була здійснена з постійним граничним рівнем у всьому інтервалі. На рис. 5, *б*) показаний сигнал, виділений адаптивним фільтром з настройками по таблиці 1. Очевидно, що модифікований алгоритм роботи фільтра дозволяє відновити сигнал значно точніше.

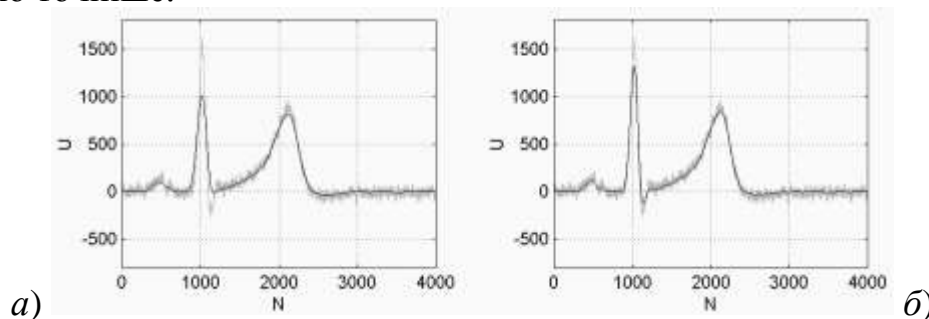


Рисунок 5 – Відновлення електрокардіосигналу: *а*) з постійним рівнем відсікання (250); *б*) адаптивна фільтрація відповідно до таблиці і рис. 4

## Висновки

Вейвлет-перетворення надає найбільш наочну та інформативну картину результатів експерименту, дозволяє очистити вихідні дані від шумів і випадкових спотворень, і навіть наочно помітити деякі особливості даних і напрямок їхньої подальшої обробки та аналізу. Крім того, вейвлети добре підходять для аналізу складних сигналів біомедичного походження. У випадку даних ЕКГ це дозволяє зробити не тільки відсічення сторонніх шумів, відновлення ізолінії та виділення інтервалів R-R, але і враховувати локалізацію особливостей (адаптивна фільтрація) ЕКС при її фільтрації [2].

Завдяки високій ефективності алгоритмів та стійкості до впливу перешкод, вейвлет-перетворення є потужним інструментом у тих областях, де традиційно використовувалися інші методи аналізу даних, наприклад, перетворення Фур'є. Можливість застосування вже існуючих методів обробки результатів перетворення, а також характерні риси поводження вейвлет-перетворення в частотно-часовій області дозволяють істотно розширити й доповнити можливості подібних систем [4 - 6].

## Література

1. Абакумов В.Г., Геранін В.О., Рибін О.І., Сватош Й., Синєкоп Ю.Г. Біомедичні сигнали та їх обробка. – К.: ВЕК, 1997. – 352 с.
2. Шитов А.Б. Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для моделирования и обработки экспериментальных данных. – Ивановск. ИГУ, 2001.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Пер. с англ. – Ижевск: НИЦ регулярная и хаотическая динамика, 2001.
4. Астафьева Н.М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения // Успехи Физических Наук. -166 (1996). - № 11. -Р. 1145-1170.
5. Дьяконов В.П. Вейвлеты: От теории к практике. – М.: Солон-Р, 2002. – 448 с.
6. Л.В. Новиков. Адаптивный вейвлет-анализ сигналов // Научное приборостроение. –1998. -Т. 9, № 2. -С. 35.

Майстренко В.Н., Дегтярев П.Е., Терещенко Т.А. **Применение вейвлет-анализа для фильтрации электрокардиографических данных**

Показано возможность использования вейвлет-преобразования для фильтрации электрокардиографических данных, что позволяет сделать не только отсечение посторонних шумов, восстановление изолинии и выделение интервалов R-R, но и учитывать локализацию особенностей электрокардиосигнала при его фильтрации.

Majstrenko V.N., Degtjarev P.E., Tereshenco T.A. **Application wavelet-analysis for a filtration electrocardiography the data**

The opportunity of application wavelet-transformation for a filtration electrocardiography the data that allows to make not only cutting off of extraneous noise, restoration isoline and allocation of intervals R-R but also to take into account localization of features electrocardiosignal at his filtration.

Надійшло до редакції  
23 травня 2004 року