

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЧАСОВОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ ЗОНДУВАННЯ

© Тишик І. Я., Совин Я. Р., 2014

Для підвищення точності часової локалізації відбитих імпульсних сигналів зондування запропоновано здійснювати їх опрацювання безпосередньо у часо-частотній (вейвлет) області. Показано, що таке подання дає змогу якісно оцінювати час надходження відбитих сигналів на тлі завад. Наведено результати моделювання відбитих імпульсних сигналів у часовій та вейвлет-областях й оцінку похибок.

**Ключові слова:** імпульсний сигнал, часо-частотна область, вейвлет-перетворення, завадостійкість.

**For the improvement of time accuracy localizing for the reflected pulse sounding signals is proposed with purposeit their process in a time-frequency (wavelet) domain directly. It is shown that such presentation allows qualitatively to estimate time for the reflected pulse sounding in noise conditions. The results of design for the reflected pulse signals into a time and wavelet domains are resulted, an estimation is given to the errors.**

**Key words:** pulse signal, time-frequency domain, wavelet transform, noise robustness.

### Вступ

Для оцінки малих віддалей до об'єктів системами ближньої локації (наприклад, у медицині, гідроакустиці, ультразвукових системах локації, для контролю дистанції між автотранспортом під час його руху в умовах недостатньої видимості на невеликих швидкостях) широко використовуються як зондувальні короткотривалі сигнали, оскільки такі сигнали дають змогу забезпечити необхідну роздільну здатність щодо віддалі. Під час аналізу та опрацювання таких сигналів традиційними методами (кореляційний, кореляційно-фільтровий, на основі часо-частотного фільтра, робота якого ґрунтується на дискретному віконному перетворенні Фур'є тощо) виникає проблема забезпечення їх крутизни. Подані методи опрацювання призводять до значних похибок під час оцінювання часових параметрів відбитих короткотривалих сигналів унаслідок їх спотворення зовнішніми та внутрішніми завадами. Аналіз таких відбитих сигналів у частотній області не вирішує цієї проблеми, а значить, не вдається якісно оцінити час надходження вказаних сигналів, що призводить до виникнення додаткових похибок у процесі оцінювання віддалі.

Перспективною технікою для опрацювання сигналів з перепадами рівня є вейвлет-перетворення. У працях [1–3] показано, що саме вейвлет-фільтрація є оптимальною для сигналів з апіорі невідомою формою. Для опрацювання сигналів зі стрибками середнього значення (наприклад, прямокутні імпульси) запропоновано метод з адаптивним порогом, який дозволяє частково зберегти різкий фронт імпульсу, що значно зменшує похибку його часової локалізації. У роботі запропонований альтернативний метод для підвищення точності дистанційного вимірювання віддалі до об'єкта зондування, який ґрунтується на визначенні локальних часових координат сукупності вейвлет-коефіцієнтів відбитого сигналу, одержаних на виході відповідних фільтрових систем.

### Аналіз досліджень та публікацій

У багатьох пристроях і системах локації для оцінювання параметрів руху об'єктів широко використовують як зондовані короткотривалі імпульсні сигнали, оскільки такі сигнали дають змогу

отримати необхідну роздільну здатність щодо віддалі. З урахуванням специфіки цих сигналів інформативним параметром переважно слугує різницеве значення, що характеризує запізнення в часі прийнятого сигналу відносно випроміненого (опорного). Отже, відбитий від рухомого об'єкта сигнал матиме часове зміщення щодо попередньої (випроміненої) його версії. Для опрацювання вищеподаних сигналів переважно використовують кореляційні та кореляційно-фільтрові методи [4, 5]. Згадані методи втрачають ефективність, якщо сигнали приймаються з високим вмістом завад і при цьому невідома апріорна інформація про їх вид і характер зміни. Крім того, ефективність, зокрема, спектральних методів опрацювання згаданих сигналів знижується, оскільки за відповідної фільтрації не вдається врахувати високочастотні складові, які описують області розриву сигналу. Це призводить до спотворення фронтів цього сигналу під час його реконструкції у часовій області, а отже, до виникнення додаткових похибок у процесі оцінювання віддалі.

У деяких працях [6–8] з метою покращення точності оцінювання часового зміщення відбитого сигналу щодо випроміненої його версії на тлі різного типу завад здійснюється опрацювання цих сигналів з використанням техніки вейвлет-перетворення.

Відомо, що вейвлет-перетворення особливо вигідно використовувати у тих випадках, коли результат аналізу деякого сигналу повинен містити не лише просте перелічення його характерних частот, але і відомості про визначені локальні координати, за яких ці частоти себе проявляють. Вейвлет-перетворення виявляється дуже зручним інструментом для адекватного представлення сигналів з локалізованими частотами, оскільки елементи його базису добре локалізовані й володіють рухомим часо-частотним вікном. За рахунок постійної зміни розміру вікна вейвлет-перетворення здатне забезпечити пропорційну роздільну здатність у кожній частотній смузі, що дає змогу створювати вікна з постійними фрактальними роздільними здатностями ширини смуг, за рахунок чого уможливується аналіз та порівняння сигналів з перепадами рівня. Отже, аналіз і опрацювання короткотривалих сигналів зондування з метою оцінювання їх часових параметрів є основним полем застосування вейвлет-перетворення.

Фільтрацію сигналів за допомогою вейвлет-перетворення традиційно здійснюють у чотири етапи: розклад досліджуваного сигналу за базисом вейвлетів; вибір порогового значення шуму для кожного рівня розкладу; порогова фільтрація коефіцієнтів деталізації; реконструкція сигналу в часову область.

Зі статистичного погляду подана методика являє собою непараметричну оцінку регресивної моделі сигналу з використанням ортогонального базису. Методику найкраще застосовувати для аналізу достатньо гладких сигналів, у розкладі яких лише невелика кількість коефіцієнтів деталізації значно відрізняється від нуля [3, 6].

Вибір вейвлет-функції і глибина вейвлет-розкладу, в загальному випадку, залежать від властивостей конкретного досліджуваного сигналу. Під час вибору цих параметрів, як правило, дотримуються таких рекомендацій: гладші вейвлет-функції створюють гладшу апроксимацію сигналу, і навпаки – короткотривалі вейвлет функції краще відслідковують локальні особливості апроксимуючої функції; глибина декомпозиції впливає на масштаб відсіюваних деталей. Зі збільшенням глибини розкладу модель вираховує складові шуму усе вищого рівня доти, доки не настане “переукрупнення” масштабу деталей і перетворення почне спотворювати форму вихідного сигналу. Отже, за подальшого збільшення глибини розкладу перетворення починає формувати згладжену версію вихідного сигналу, відфільтровуючи не лише шумові складові, але й деякі складові, які описують локальні особливості досліджуваного сигналу, що призводить до погіршення точнісних характеристик під час оцінювання часових параметрів відбитих короткотривалих сигналів.

В умовах нестационарності сигналів і наявності в них вимушеного шумового тла вейвлет-функції є найпридатнішим базисом для розв'язання завдання ефективної фільтрації таких сигналів у поєднанні з доброю часовою локалізацією їх особливостей. З огляду на сказане, у роботі пропонується здійснювати опрацювання зондованих короткотривалих сигналів локаційних систем на основі вейвлет-перетворення з подальшим оцінюванням часових координат їх складових декомпозиції безпосередньо у часо-частотній (вейвлет) області, що повинно привести до підвищення точності оцінювання часових параметрів таких відбитих сигналів на тлі завад.

### Опрацювання короткотривалих сигналів зондування

У роботі для підвищення точності оцінювання параметрів руху об'єктів досліджено можливість аналізу короткотривалих імпульсних зондувального та відбитого сигналів у вейвлет-області. У разі використання широкосмуговими системами локації такого типу сигналів інформативним параметром є час надходження відбитого сигналу відносно випроміненої його версії.

У загальному випадку такий випромінюваний сигнал подається як прямокутний імпульс одиничної амплітуди  $s(t_c)$  (рис. 1, а). Відбитий від об'єкта сигнал  $s'(t_c)$  моделюється як затримана на  $t_3$ , спотворена шумами версія випромінюваного сигналу (рис. 1, б).

Залежність величини часу затримки між відбитим і випромінюваним сигналами щодо віддалі є лінійною. Фільтрування зашумленого сигналу здійснюється відомим традиційним способом [4, 5]. Відфільтрований сигнал подано на рис. 1, в.

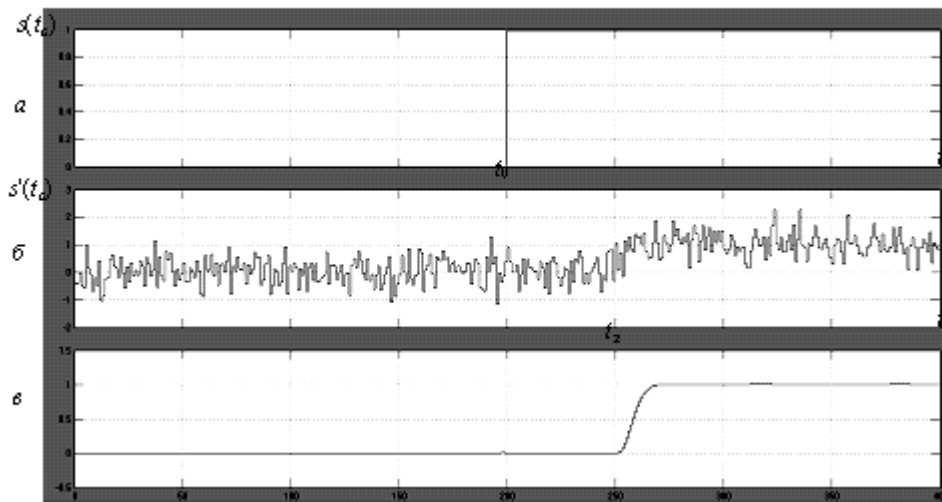


Рис. 1. Подання випромінюваного та відбитого сигналів локації у часовій області: а – обвідна випромінюваного (зразкового) сигналу  $s(t_c)$ ; б – обвідна імітованого відбитого сигналу  $s'(t_c)$ ; в – відфільтрована класичним способом обвідна відбитого сигналу  $s'(t_c)$

Для здійснення ефективної фільтрації  $s(t)$  на кожному рівні декомпозиції встановлюють відповідну величину порога  $\lambda_j$ . Фіксація величини цього порога являє собою мінімаксну оцінку, для якої реалізується мінімум середньоквадратичної похибки відтворення сигналу з використанням отриманого вектора коефіцієнтів вейвлет-перетворення [3]. Згідно з такою статистичною оцінкою для вектора вейвлет-коефіцієнтів завдовжки  $N_j \leq 32$  величина порога  $\lambda_j = 0$ ; в інших випадках для відповідного рівня декомпозиції  $j$ :

$$\lambda_j = 0,3936 + 0,1829(\log(N_j)/\log(2)). \quad (1)$$

Оскільки результат вейвлет-аналізу сигналу містить не лише простий перелік його характерних частот, а і відомості про певні локальні часові координати, за яких ці частоти себе проявляють, то величини вейвлет-коефіцієнтів кожного рівня декомпозиції  $d_{j,n}$ ,  $c_{j,n}$  та  $d'_{j,n}$ ,  $c'_{j,n}$ , одержані в результаті згортки фільтрових коефіцієнтів з вибірками сигналу на основі алгоритму Малла [2], локалізовані у часі. Отже, у разі запізнення відбитого від об'єкта імпульсу відносно опорного, пропорційно затримуються значення вейвлет-коефіцієнтів його декомпозиції  $c'_j$  та  $d'_{j,n}$  відносно значень вейвлет-коефіцієнтів декомпозиції опорного імпульсу  $c_j$  та  $d_{j,n}$  відповідно, де  $j = 1, 2, \dots, J$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ .

Порогування коефіцієнтів деталізації здійснюється на основі такої умови:

$$d'_{j,n} = \begin{cases} d'_{j,n} + \lambda_j & \text{при } d'_{j,n} < 0 \text{ і } |d'_{j,n}| > \lambda_j \\ d'_{j,n} - \lambda_j & \text{при } d'_{j,n} > 0 \text{ і } |d'_{j,n}| > \lambda_j \\ 0 & \text{при } |d'_{j,n}| \leq \lambda_j \end{cases} \quad (2)$$

Опрацьовуватися надалі будуть вейвлет-коефіцієнти опорного  $d_{j,n}$  та відбитого  $d'_{j,n}$  сигналів, які визначатимуться згідно з умовою (2).

Результуюче значення вейвлет-складових опорного  $V_o$  та відбитого  $V_v'$  сигналів за усіма рівнями декомпозиції становитиме:

$$V_o = \sum_{j=1, z=\frac{(N-1)}{2^j}(J-j)}^J d_{j,n-z}, \quad V_v' = \sum_{j=1, z=\frac{(N-1)}{2^j}(J-j)}^J d'_{j,n-z} \quad (3)$$

де  $z$  – параметр, який нівелює різницю часового зміщення між вейвлет-складовими щодо кожної підсмуги декомпозиції.

У точках перетину  $V_o$  та  $V_v'$  з порогом  $\lambda_k$  ( $\lambda_k$  вибирається як  $1/2\max(V_v')$ ) формуються нормовані функціональні залежності  $F(V_o)$  та  $F(V_v')$ :

$$F(V_o) = \begin{cases} 1 & \text{при } V_o \geq \lambda_k \\ 0 & \text{при } V_o < \lambda_k \end{cases}, \quad F(V_v') = \begin{cases} 1 & \text{при } V_v' \geq \lambda_k \\ 0 & \text{при } V_v' < \lambda_k \end{cases}, \quad (4)$$

які є новими представленнями відповідно опорного та відбитого сигналів локації після порогування у вейвлет-області.

Інформативне значення, покладене в основу формування оцінки віддалі до об'єкта локації, у вейвлет-області  $D$  визначається як різниця функціональних залежностей:

$$D = F(V_o) - F(V_v') = F\left(\sum_{j=1, z=\frac{(N-1)}{2^j}(J-j)}^J d_{j,n-z}\right) - F\left(\sum_{j=1, z=\frac{(N-1)}{2^j}(J-j)}^J d'_{j,n-z}\right). \quad (5)$$

Особливістю розглянутого способу оцінки віддалі до рухомого об'єкта локації є можливість одержання цієї оцінки безпосередньо у вейвлет-області. Згадана оцінка формується на основі знайдених локальних часових координат сукупності вейвлет-коефіцієнтів випромінюваного та відбитого сигналів, одержаних на виході відповідних фільтрових систем. Значення різниці часового зсуву цієї сукупності лінійно залежить від відстані до об'єкта локації. Остаточне різницеве інформативне значення зсуву визначається як різниця нормованих функціональних залежностей, сформованих у точках перетину на деякому рівні із певними значеннями сукупності вейвлет-складових опорного та прийнятого сигналів. Такий підхід дає можливість суттєво зменшити похибку оцінки часової залежності між випромінюваним і відбитим сигналами, яка зумовлена зтягуванням переднього фронту відбитого сигналу.

### Моделювання процесу опрацювання прийнятого сигналу локації

Як зазначено вище, для підвищення точності дистанційного вимірювання віддалі до об'єкта зондування запропоновано опрацьовувати обвідні імпульсних зондованого та відбитого сигналів на основі їх попереднього вейвлет-перетворення. Інформативним параметром у цьому випадку слугують різницеві значення сукупності вейвлет-коефіцієнтів відповідних рівнів, які характеризують запізнення в часі прийнятого сигналу відносно опорного.

У процесі опрацювання випромінюваного та відбитого сигналів у вейвлет-області використовувалися базові функції Хаара та пірамідальний алгоритм Малла. Кількість рівнів розкладу для вхідних сигналів становила 8. Представлені у вигляді вейвлет-коефіцієнтів вхідні сигнали, підсумовувалися на відповідних рівнях упродовж інтервалу опрацювання. На імітований відбитий сигнал накладався шум з гауссівським розподілом, рівень якого становить 30 % від рівня

максимальної амплітуди сигналу. Час встановлення переднього фронту прийнятого сигналу змінювався від 0 до 50 % тривалості імітованого відбитого сигналу.

З метою порівняння із запропонованим способом опрацювання здійснено опрацювання згаданих сигналів традиційним способом безпосередньо у часовій області та на основі традиційного вейвлет-перетворення з використанням “універсального” критерію для вибору рівня порога [8].

Результати досліджень процесу опрацювання зондованого та відбитого широкосмугових сигналів, які проводилися згідно із запропонованим алгоритмом, наведено на рис. 2 – 4.

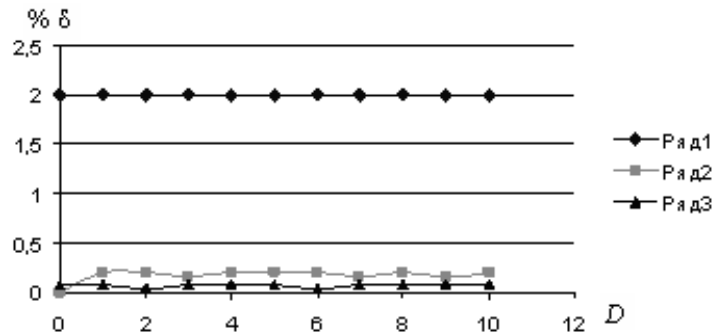


Рис. 2. Залежності зведених похибок від різницьких значень опорного та відбитого зміщеного сигналів без затягування переднього фронту обвідної прийнятого сигналу. (Ряд 1 – традиційний спосіб опрацювання), (Ряд 2 – вейвлет-опрацювання зі зворотним перетворенням), (Ряд 3 – вейвлет-опрацювання без зворотного перетворення)

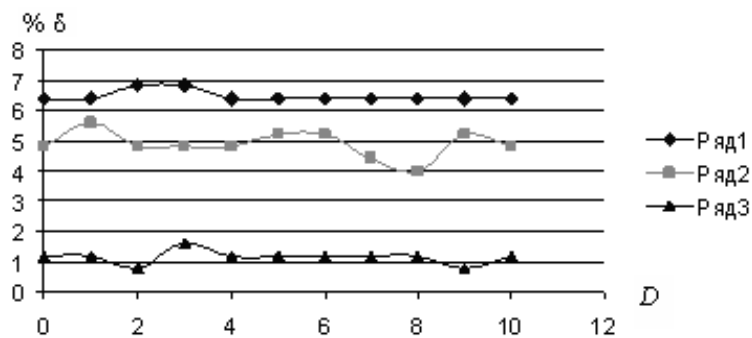


Рис. 3. Залежності зведених похибок від різницьких значень опорного та відбитого зміщеного сигналів за 30-процентного затягування переднього фронту обвідної прийнятого сигналу. (Ряд 1 – традиційний спосіб опрацювання), (Ряд 2 – вейвлет-опрацювання зі зворотним перетворенням), (Ряд 3 – вейвлет-опрацювання без зворотного перетворення)

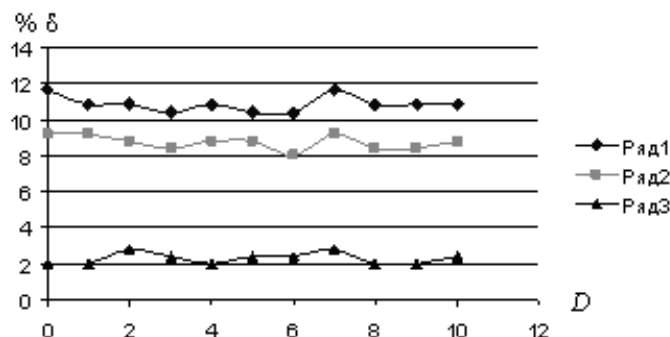


Рис. 4. Залежності зведених похибок від різницьких значень опорного та відбитого зміщеного сигналів за 50-процентного затягування переднього фронту обвідної прийнятого сигналу. (Ряд 1 – традиційний спосіб опрацювання), (Ряд 2 – вейвлет-опрацювання зі зворотним перетворенням), (Ряд 3 – вейвлет-опрацювання без зворотного перетворення)

## Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що опрацювання короткотривалих сигналів зондування з використанням попереднього їх вейвлет-перетворення забезпечує одночасно ефективну фільтрацію від завад і добру часову локалізацію таких сигналів. Встановлено, що найбільш вигідним та інформативним є використання часо-частотної (вейвлет) форми подання згаданих сигналів з подальшим їх опрацюванням у цій області. Такий підхід забезпечує можливість ефективного опрацювання короткотривалих сигналів зондування відповідними системами локації, вищі завадостійкість і точність оцінювання віддалі до об'єкта локації порівняно з традиційними способами подання та опрацювання таких сигналів.

1. Наконечний А. Й. *Покращення точності приладів вимірювання параметрів руху на основі малохвильового перетворення сигналів* / А. Й. Наконечний, І. Я. Тишик // *Комп'ютерні технології друкарства: зб. наук. пр.* – Л.: Українська академія друкарства, 2002, – № 5, 6. – С. 145–149.

2. Тишик І. Я. *Покращення інформативності вимірювачів параметрів руху об'єктів* / А. Й. Наконечний, І. Я. Тишик // *Комп'ютерні технології друкарства: зб. наук. пр.* – Л.: Українська академія друкарства. – 2007. – № 18. – С. 146–152.

3. Тишик І. Я. *Комп'ютеризовані засоби оцінювання параметрів руху об'єктів на основі малохвильового (вейвлет) перетворення сигналів зондування: дис. канд. техн. наук 05.13.05* / Тишик Іван Ярославович. – Л. 2014. – 256 с.

4. Бакулев П. А. *Радиолокационные системы* / П. А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.: ил.

5. Кузьмин С. З. *Цифровая радиолокация* / С. З. Кузьмин. – К.: ВЦ, 2000.

6. Aly O.A.M. and Omar A.S. *Detection and localization of RF-radar pulses in noise environments using wavelet packet transform and higher order statistics* // *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 58, 301–317, 2006.

7. Тишик І. Я. *Виявлення та локалізація короткотривалих радіоімпульсних сигналів з використанням малохвильового (вейвлет) перетворення* / І. Я. Тишик // *Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”: Комп'ютерні системи та мережі.* – 2009. – № 658. – С. 128–132.

8. Тишик І. Я. *Моделювання процесу опрацювання зондованих широкосмугових сигналів вейвлет-перетворенням* / І. Я. Тишик // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Автоматика, вимірювання та керування.* – 2010. – № 665. – С. 117–122.